

## Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur:.....	1
0 Motivation.....	3
1 Vorbetrachtung und theoretische Grundlagen .....	4
1.1 Grundlegende Begriffe.....	4
1.2 Power Injection Method – PIM.....	5
1.3 Finite Elemente Methode – FEM .....	7
1.4 Statistische Energieanalyse – SEA.....	8
1.4.1 Anfänge der SEA.....	8
1.4.2 Was ist die SEA und welche Grenzen existieren? .....	10
1.4.3 Vorgehen und Berechnung der Verlustfaktoren.....	12
1.5 Messgrundlagen.....	14
2 Vorgehen, Messungen und Auswertung .....	14
2.1 Ziel.....	14
2.2 Vorbereitende Messungen .....	15
2.2.1 Vorgehen Messung A .....	16
2.2.2 Ergebnisse Messung A .....	18
2.2.3 Vorgehen Messung B .....	22
2.2.4 Ergebnisse Messung B.....	22
2.3 Messstrategie.....	25
2.4 Auswertung anhand zweier Subsysteme .....	28
2.5 Messergebnisse und Diskussion .....	34
3 Fazit .....	40
Anhang .....	42
Quellenverzeichnis.....	56
Eigenständigkeitserklärung.....	58

## Nomenklatur:

$a$	Beschleunigung
$B'$	Biegesteifigkeit
$c$	Schallgeschwindigkeit
$c_L$	Longitudinalwellengeschwindigkeit
$f$	Frequenz
$E$	E-Modul
$E_{i,j}$	Schwingungsenergie in System $j$ bei Anregung in $i$
$F$	Kraft
FFT	Fast Fourier Transformation
FRF	Frequency Response Function (Antwortfunktion)
$h$	Dicke
$I$	Invertierte Matrix
$L_{FRF}, L_i$	Pegel der Übertragungsfunktionen
$m$	Masse
$m''$	Flächenbezogene Masse
$n$	Messpunktanzahl
$N$	Modenanzahl
$P_j$	eingetragene Leistung im Subsystem $j$
$r$	Dämpfung
$s$	Federsteifigkeit
$S$	Systemfläche
$t$	Zeit
$v$	Schnelle
$V$	Volumen

$x$	Verschiebung
$x, y, z$	Raumrichtungen
$\eta$	Verlustfaktor
$\rho$	Dichte
$\rho''$	flächenbezogene Dichte
$\omega$	Kreisfrequenz
$\xi$	Auslenkung

Abkürzungsverzeichnis:

Abb.	Abbildung
AP	Anregepunkt
CLF	Kopplungsverlustfaktor
DLF	Dämpfungsverlustfaktor
FEM	Finite Elemente Methode
MP	Messpunkt
PIM	Power Injection Method
SEA	Statistische Energieanalyse

## 0 Motivation

Die Karosserie als komplexe räumliche Struktur mit einem ausgeprägten Eigenschwingverhalten erfährt unterschiedlichste Anregungen, die über das Fahrwerk, die Abgasanlage und den Antriebsstrang eingeleitet werden.

Charakteristische Merkmale der Karosserie sind die dynamische Steifigkeit an den Anregungsstellen, das Körperschall – Übertragungsverhalten innerhalb der Karosseriestruktur, sowie die Abstrahlung des Körperschalls in den Fahrzeuginnenraum.

Für die Ermittlung des Körperschall – Übertragungsverhaltens müssen spezielle Methoden angewendet werden, um diesen beeinflussen zu können.

Unter Nutzung der Power Injection Method wird der Energieaustausch zwischen Subsystemen einer Fahrzeugrohkarosserie gemessen und die jeweiligen Übertragungsfunktionen bestimmt.

Besonderes Augenmerk wird auf die Datenauswertung gelegt, da bereits einige VBA – Tools in Microsoft - Excel vorhanden sind und eine Erweiterung erarbeitet werden soll.

Ziel ist eine variable Datenstruktur für die Anzahl der Subsysteme, die Auswahl der auszuwertenden Terzen (Terzberechnung), der grafischen Darstellung des Energieflusses der benachbarten Subsysteme sowie einer sinnvollen Verrechnung der Kopplungsverlustfaktoren zwischen den Subsystemen auf zu bauen.

## 1 Vorbetrachtung und theoretische Grundlagen

## 1.1 Grundlegende Begriffe

Körperschall:

Druckunterschiede am Trommelfell des Menschen entstehen hauptsächlich durch Longitudinalwellen in dem umgebenden Fluid. Diese Wellen werden vor allem durch schwingende Festkörper, wie z.B. Saiten einer Geige, Lautsprechermembranen oder sonstige schwingende Flächen, erzeugt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei bei dem vom Menschen wahrnehmbaren Frequenzbereich von 16Hz – 20kHz. In Fluiden wie Luft oder Wasser breitet sich die Energie hauptsächlich in Schwingungen der Art Longitudinalwellen aus. Im Gegensatz dazu sind in Festkörpern Transversalwellen und Longitudinalwellen ähnlich stark vertreten. Dabei erzeugen sie durch Überlagerung weitere Wellenarten, wie Biege- oder Torsionsschwingungen. Hinsichtlich der großen Zahl und der geometrischen Abmessungen von schwingfähigen Körpern und Systemen sind die Parameter des Körperschalls über einen breiten Bereich ausgedehnt. Amplituden treten dabei in Bereichen von  $10^{-11}$ m (leise, hochfrequent) bis  $10^{-3}$ m (laut, tieffrequent) auf. Die Körperschallschnelle kann dabei von  $10^{-7}$ m/s bis fast 1m/s reichen. Die messbaren Beschleunigungen liegen hier zwischen  $10^{-3}$ m/s<sup>2</sup> und  $10^4$  m/s<sup>2</sup>. Durch die vorhandene Ausbreitung von Schall in Festkörpern folgt, dass sich ein Energiefluss einstellen muss. Wie bei bekannten Systemen der Physik, ist dieser von energiereichen Teilbereichen zu energieärmeren Teilbereichen, gerichtet. Das Level der mittleren Energie eines Systems kann u.a. durch die Power Injection Method bestimmt werden. [1]

### Einmassenschwinger:

Der Einmassenschwinger ist die einfachste Darstellung eines schwingfähigen Systems. Dabei stellt  $m$  die Masse des Systems dar,  $r$  spiegelt die Dämpfung wider und  $s$  die Federsteifigkeit.  $F$  wird als anregende Kraft und  $\xi$  als Auslenkung aus der Ruhelage angesehen. In komplexen

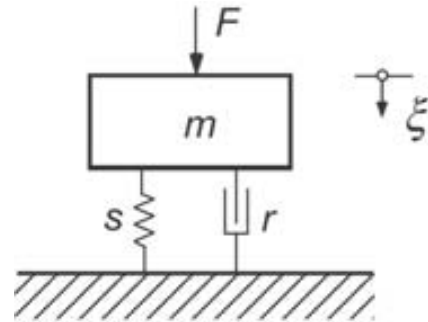


Abbildung 1 Einmassenschwinger [1]

Systemen kann zur Beschreibung, ähnlich wie beim Einmassenschwinger, der rückwirkenden Kraft eine Federkraft zuordnet werden. Der inneren Reibungen wird eine Dämpfung und der schwingenden Struktur eine Flächenmasse zugewiesen. Mehrere dieser Systeme gekoppelt bilden komplexe Strukturen nach. Durch Anregung eines solchen Systems mit einer äußeren Kraft können Schwingenergien eingetragen und durch Beschleunigungsaufnehmer gemessen werden. Rechnerisch werden aus den Messdaten komplexe Matrizen erstellt, aus denen u.a. Energieflüsse und Verlustfaktoren berechnet werden können.

## **1.2 Power Injection Method – PIM**

---

Die Power Injection Method ist weithin die gängige Technik um die (SEA-) Parameter einer Struktur in situ zu bestimmen, wobei die einzelnen Subsysteme nicht entkoppelt werden müssen. Es handelt sich um eine experimentelle Methode, bei der durch Hammermessungen, über geeignete Sensoren, Beschleunigungen aufgenommen werden. Durch Integration kann aus der gemessenen Punktbeschleunigung, die Schwinggeschwindigkeit an einem Ort ermittelt werden, wodurch aus einer Inertanz (Akzeleranz) eine Admittanz (Mobilität) wird.

Schwingweg (Verschiebung) $x$	$\frac{F(\omega)}{x(\omega)} = C$	Dynamische Steifigkeit
	$\frac{x(\omega)}{F(\omega)} = N$	Dynamische Nachgiebigkeit
Schwing- geschwindigkeit (Schnelle) $\dot{x} = v$	$\frac{F(\omega)}{v(\omega)} = Z$	Impedanz (Mitgang)
	$\frac{v(\omega)}{F(\omega)} = Y$	Mobilität (Admittanz)
Schwing- beschleunigung $\ddot{x} = a$	$\frac{F(\omega)}{a(\omega)} = M$	Dynamische Masse
	$\frac{a(\omega)}{F(\omega)} = A$	Akzeleranz (Inertanz)

Tabelle 1 Übertragungsfunktionen mit gebräuchlichen Begrifflichkeiten [3]

Bei der PIM wird zur Parameterbestimmung die eingebrachte Energie jedes einzelnen Subsystems ermittelt und das Energielevel der Subsysteme bestimmt. Da Energien im Normalfall nicht direkt gemessen werden können, werden die mittleren Beschleunigungen oder Schwinggeschwindigkeiten einer Struktur erfasst. Im Allgemeinen wird für die PIM eine mehr oder weniger vordefinierte Anzahl von Anregepunkten und Antwortpunkten festgelegt. In der Literatur [2], [11] wurde eine feste Einteilung von 3 Anregepunkten und 5 Messpunkten verwendet. Dieser Ansatz besitzt jedoch nicht für alle Subsysteme Gültigkeit, da sie in Größe, Komplexität und Energieinhalt variieren. Demnach können sie mit mehr oder weniger Punkten auskommen. Die Antworten werden mit Beschleunigungsaufnehmern oder ähnlichen Messsystemen (Laservibrometer für direkte Geschwindigkeitsmessung, ect.) aufgenommen. Die frequenzabhängige Antwortfunktion (Frequency Response Function) *FRF* wird per FFT gebildet, indem die gemessene Beschleunigung in den Antwortpunkten auf die eingetragene Kraft an den Erregerpunkten bezogen wird. Es kann im Folgenden eine Energiebilanz

aufgestellt werden, aus der daraufhin die Kopplungsverlustfaktoren zwischen den Systemen berechnet werden können.

### 1.3 Finite Elemente Methode – FEM

---

Die FE Methode ist ein Modell zur numerischen Berechnung von Eigenschaften schwingfähiger Festkörper. Von Energieübertragungen bis zu Schwingungseigenschaften in hochkomplexen Systemen ist die Berechnung auf Grund heutiger Rechentechnik möglich. Trotzdem sind dieser Methode, auf Grund der Komplexität der Daten und Parameter, Grenzen gesetzt. Beispielsweise ist für Fahrzeugmodelle die Berechnung der akustischen Eigenschaften bis mehrere 100Hz Stand der Technik, da hier klare diskrete Schwingformen vorherrschen. Die Modendichte nimmt oberhalb 200Hz deutlich zu und damit steigt der Rechenaufwand in Bereiche, die den Zeit – Aufwandnutzen überschreiten. Außerdem wird der Vertrauensbereich oberhalb der 200Hz in diese Methode geringer, weil eine zuverlässige Modellierung von Fügestellen, Anbauteilen wie Scharnieren oder Schlössern nicht bekannt ist. Da der interessante Frequenzbereich oft deutlich über den möglichen Leistungen der FEM liegt, müssen andere Methoden Anwendung finden, bei denen die Komplexität der Parameter und Daten deutlich herab gesetzt werden kann. In der hier vorliegenden Arbeit werden die Eigenschaften der Bodenstruktur einer B8 – Rohkarosserie mit Hinblick auf die Energieübertragung in der Struktur untersucht. Damit sind vor allem Frequenzen oberhalb der sinnvollen Anwendung der FEM, also von 200Hz – 2kHz, von Interesse.



## 1.4 Statistische Energieanalyse – SEA

---

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über das Verfahren der SEA. Dabei werden die Anfänge dieser Technik, die Abgrenzungen und die Rechnung genauer betrachtet.

### 1.4.1 Anfänge der SEA

Die Statistische Energieanalyse ist in den frühen 60er Jahren als neues wichtiges Feld für Studien des Energieflusses in Körpern entwickelt worden. Dabei werden die Variablen und Parameter der SEA aus der statistischen Menge von Übertragungsfunktionen entwickelt. Die Energie ist für diese Technik die hauptsächlich interessierende Größe. Andere Variablen wie Schnelle, Steifheit oder Schalldruckpegel können aus dieser Größe abgeleitet werden. Die Analyse bezeichnet die Technik der SEA um Schallflüsse und Eigenheiten des Körpers zu berechnen.

Antrieb fand die Forschung in der Schwingung von Böden und Wänden in hohen Frequenzbereichen. Dabei wurden vor allem Raumakustische Probleme gelöst. Doch viele zivile Ingenieure und Unternehmen hatten Interesse daran, die Ausbreitung von der Schwingungsenergie in Strukturen zu verstehen. Führend sind hier die Luftfahrtunternehmen zu nennen, die mit sehr steifen und gleichzeitig leichten Materialien oder großen Flächen Flugzeuge bauen, die auf Schwingungen sehr sensibel reagieren. Diese besaßen bereits Erfahrungen im Bereich der Schwingungen und Energieflüsse durch jahrelange Ingenieurskunst im Bereich Flugzeugbau. Um jedoch genauere Informationen und mehr Wissen in diesem Bereich zu erhalten, wurde sich der SEA bedient.



#### 1.4.2 Was ist die SEA und welche Grenzen existieren?

Die SEA ist eine statistische Berechnungsmethode. Gerechnet wird mit den Erwartungswerten der gespeicherten Energien und ausgetauschten Leistungen zwischen gekoppelten schwingfähigen Systemen. Durch die Eigenschaften der statistischen Sicherheit, kann bei dieser Methode auf die genaue Berechnung von Betrag und Phase der Schallwellen, verzichtet werden.

Um diese statistische Sicherheit zu gewährleisten, wird in der Praxis darauf geachtet, dass in einem System (Subsystem in dem gemessen wird) die Modendichte  $\Delta N / \Delta f$  ausreichend groß ist. Damit ist ein näherungsweise diffuses Schallfeld im Subsystem zu erwarten. Dazu wird über möglichst viele Moden gemittelt. Dies geschieht durch die Mittelung über einen entsprechenden Frequenzbereich, also Terzen oder Oktaven. Als Richtwert wird in der Praxis eine Modenanzahl von  $\Delta N \geq 6$  je Frequenzband  $\Delta f$  angewendet.

$$\frac{\Delta N}{\Delta f} = \frac{S}{2} \sqrt{\frac{m''}{B'}} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} m'' &= \rho \cdot h \\ B' &= \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$E = c_L^2 \cdot \rho$$

Wenn man davon ausgehen kann, dass das Gesamtsystem hinsichtlich Dichte, Dicke und Material nahezu homogen ist, zeigt (1.1), dass die Modenanzahl in einem Teilsystem nur von dessen Fläche  $S$  und dem betrachteten Frequenzband abhängig ist. Der Faktor  $1/(1-\mu^2)$  beeinflusst die Rechnung nur geringfügig und wird im folgenden Beispiel, wie auch in der Praxis üblich, vernachlässigt.

Folgende Tabelle zeigt Richtwerte für die Subsystemmindestgrößen bezogen auf die Mittenfrequenzen:

$f_m$ in Hz	$\Delta f$ in Hz	S in cm <sup>2</sup>
200	46,3	1872
250	58,4	1486
315	73,5	1179
400	92,7	936
500	116,8	743
630	147,1	589
800	185,4	468
1000	233,6	371
1250	294,3	295
1600	370,8	234
2000	467,2	186

$$c_L = 5000 \frac{m}{s}$$

$$\rho = 7800 \frac{kg}{m^3}$$

$$\Delta N = 6$$

$$h = 0,5mm$$

Tabelle 2 Angaben für die Größen rechteckiger Flächen bei Stahlblech

Diese Flächen gelten für eine allseitig fest eingespannte Platte. Die tatsächlichen Eigenschaften liegen in der Praxis irgendwo zwischen der allseitig fest eingespannten Platte und der Platte mit freien Rändern. Es ist jedoch anzunehmen, dass man sich in der Nähe der allseitig eingespannten Platte befindet. Somit zeigt sich, sowohl eine Begrenzung der Subsystemgrößen nach unten, sowie auch eine Abhängigkeit von der Frequenz, die statistisch gesichert bewertet werden kann.

Es zeigt sich, dass die Auflösung der SEA durch die betrachteten Frequenzen und damit auch durch die Subsystemgrößen begrenzt wird.

Durch stark vereinfachte Annahmen zur Beschreibung der Subsysteme bleibt die Anzahl der Parameter für Berechnungen und Analysen relativ klein. So können durch vergleichsweise wenig Aufwand, dominante Schallpfade oder das Systemverhalten erkannt und optimiert werden. Der Vorteil der „Einfachheit“ wird hier aber durch größere Unsicherheiten gegenüber anderen Verfahren erkauft.

In und zwischen den Systemen geht Schwingungsenergie in andere Energieformen über und somit für diese Betrachtung verloren. Diesem

Zusammenhang wird dadurch Rechnung getragen, dass die schon erwähnten Verlustfaktoren  $\eta$  eingeführt werden. Bei der SEA gibt es 2 Formen von Verlusten. Zum einen Kopplungsverluste, welche durch die Kopplung zwischen Teilsystemen entstehen, zum anderen Dämpfungsverluste, die die innere Reibung, lokal gehaltene Schwingungsenergie und Abstrahlung in den umgebenden Raum eines Subsystems beinhalten.

Während Kopplungen zwischen Lufträumen und Festkörpern bereits detailliert untersucht und die Kopplungsverlustfaktoren gut bekannt sind, fehlen bei Kopplungen zwischen steifen Strukturen Erfahrungen und detaillierte Untersuchungen. Hier ist der Energieaustausch bei höheren Frequenzen stark von der Struktur und geometrischen Details der Systeme abhängig. [3]

#### 1.4.3 Vorgehen und Berechnung der Verlustfaktoren

Mit einem SEA – Modell kann der Energiepegel jedes Subsystems berechnet werden, wenn die eingespeiste Leistung und die Verlustfaktoren bekannt sind. Hier kommt, bei experimentellen Untersuchungen, die Nutzung der PIM zum Tragen. Als Ergebnis erhält man die gesamte Schwingungsenergie im betrachteten Frequenzband.

Für die Berechnung der Verlustfaktoren muss mit Hilfe der Messwerte der PIM die Schwingungsenergie des Subsystems  $j$  bei Anregung in  $i$  ermittelt werden. Außerdem errechnet man aus diesen Daten die eingebrachte Leistung in das Subsystem  $i$ .

Die Berechnung erfolgt mit:

$$E_{i,j}(\omega_{\text{Terz}}) \cong \frac{M}{\omega^2_{\text{Terz}}} \left| \overline{H_{i,j}(\omega_{\text{Terz}})} \right|^2 \quad (1.2)$$

$$P_j(\omega_{\text{Terz}}) = \frac{1}{\omega_{\text{Terz}}} \overline{\text{Im}(H_{j,j}(\omega_{\text{Terz}}))} \quad (1.3)$$

Die ermittelten Energien werden Normiert und in Matrixform gebracht.

$$E_{i,j}^n(\omega_{\text{Terz}}) \cong \omega_{\text{Terz}} \frac{E_{i,j}(\omega_{\text{Terz}})}{P_j(\omega_{\text{Terz}})} \quad (1.4)$$

Das entstandene Gleichungssystem wird im nächsten Schritt gelöst

$$\underline{I} = \underline{\eta}^0 \cdot \underline{E}^n \rightarrow \underline{\eta}^0 \quad (1.5)$$

und die Verlustfaktoren können wie folgt berechnet werden.

$$\eta_{i,j} = -\eta_{j,i}^0, \quad i \neq j \quad (1.6)$$

$$\eta_{i,i} = \sum_{k=1}^n \eta_{k,i}^0 \quad (1.7)$$

$\eta_{i,j}$  stellt dabei Kopplungsverlustfaktoren dar,  $\eta_{i,i}$  dagegen sind die Dämpfungsverlustfaktoren der Subsysteme.

Diese Gleichungen sind der elementare Bestandteil der SEA, da mit ihnen aus den vorher reduzierten Rohdaten die Verlustfaktoren berechnet werden können. Diese geben Aufschluss über den Energieaustausch zwischen mehreren Subsystemen. Dabei besteht das Problem, dass negative Verlustfaktoren entstehen können. Diese sind physikalisch jedoch nicht zu erklären und sind durch die Unschärfe des Verfahrens zu begründen. In dieser Arbeit soll versucht werden bisherige Ergebnisse auch in diesem Punkt zu verbessern.

## 1.5 Messgrundlagen

---

Um für die SEA Messwerte bereitstellen zu können, muss mit der PIM gearbeitet werden. Grundlegende Messungen wurden in einem vorherigen Praktikum durchgeführt. Diese Erfahrungen mit der PIM haben Schlussfolgerungen für die Messungen dieser Arbeit zugelassen. Dazu gehört, dass eine Messpunktfächendichte eingeführt wurde. Diese ermöglicht auch bei sehr kleinen Subsystemen das bestimmen der mittleren Energie eines Subsystems. Je höher die Messpunktdichte wird, desto größer wird jedoch der Aufwand, der für eine Messung betrieben werden muss.

Des Weiteren soll für die Messung im Gegensatz zu bisher bekannten Messungen an jedem Messpunkt angeregt werden. Die Messpunkte werden dafür frei im Subsystem verteilt.

Dieses Vorgehen ist analog zu den Ergebnissen, die sich in der Praktikumsarbeit zur PIM dargestellt haben. Dabei muss aber beachtet werden, dass lediglich in der Normalenrichtung gemessen wurde. In den folgenden Abschnitten und Messungen werden die gefundenen Grundlagen auf alle drei Raumrichtungen erweitert.

## 2 Vorgehen, Messungen und Auswertung

### 2.1 Ziel

---

Die messbaren Antworten eines Systems hängen von der Erregung und den strukturellen und dynamischen Eigenschaften der Transmissionspfade im Gesamtsystem ab. Die Einteilung der Karosserie in Subsysteme und deren Vermessung ermöglichen das Nachvollziehen der Energieflusswege. Als Folge können die Punkte des Energieeintrages oder die Bereiche der hauptsächlichen Abstrahlung in den Innenbereich

eines Fahrzeuges ermittelt werden. Mit diesen Informationen kann gezielt gegen die Schwingungsausbreitung in einer Struktur gearbeitet werden.

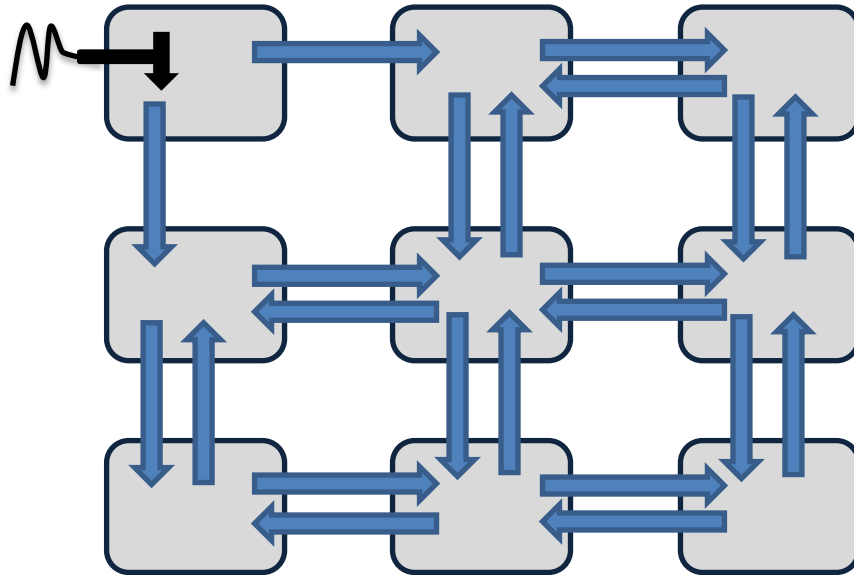


Abbildung 2 Darstellung aller möglichen Energieflusswege eines Gesamtsystems

Zur Berechnung der Energieflusswege wird die Leistung im angeregten Subsystem bestimmt. Die Messung der Schwingungsenergien erfolgt nur in den weiteren Subsystemen. Daher werden keine Energieübertragungen in das Ausgangssystem bestimmt. Durch Anregung in jedem Subsystem, werden alle möglichen Kopplungen berechenbar.

## 2.2 Vorbereitende Messungen

---

Zunächst muss sich eine geeignete Strategie zur Messung an der Karosserie zurechtgelegt werden. Dafür benötigt man noch einige detaillierte Kenntnisse der Subsysteme. Mit diesen vorbereitenden Messungen werden die Parameter und Randwerte der PIM ermittelt. Diese werden durch den Energieeintrag per Hammer, durch die Subsystemgrößen, die Qualität der Schläge und die Art der



Subsysteme/Fügungen gesetzt. Außerdem wird nach Kriterien gesucht, die es erlauben den komplexen Satz an Daten zu reduzieren.

### 2.2.1 Vorgehen Messung A

Zur detaillierten Untersuchung der Subsysteme wurden vier Systeme gewählt. Jeweils zwei Systeme der Fahrerseite und die entsprechenden Systeme der Beifahrerseite. In dieser Messung wird untersucht, welche Messpunktlächendichte für die Subsysteme nötig ist.

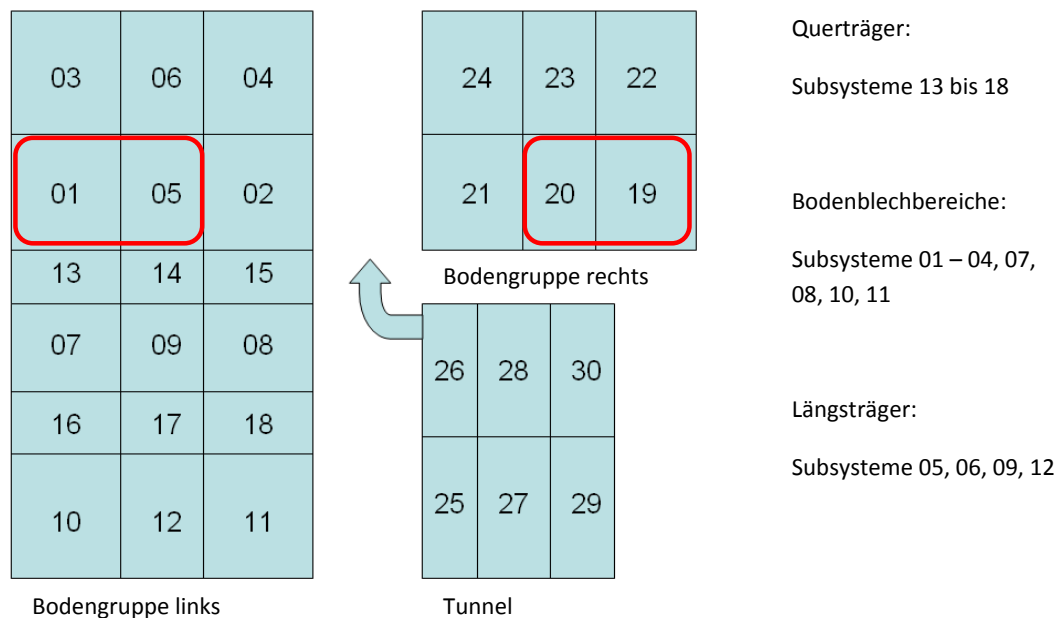


Abbildung 3 Einteilung und Bezeichnung der Subsysteme

Die Subsysteme 05 und 20 sind Systeme des Längsträgers. Die Subsysteme 01 und 19 gehören zum Bodenblechbereich. Die Anregung für die PIM wurde mit einem mittelschweren Hammer mit Stahlspitze durchgeführt. Als Messsensoren wurden neun Triaxialbeschleunigungsaufnehmer frei im Subsystem verteilt. Angeregt wurde in der Nähe aller Punkte. Um eine Anregung in allen drei Raumrichtungen möglich zu machen, wurde ein ca. 1cm<sup>3</sup> großer

Aluminiumwürfel mit X60 Schnellkleber aufgebracht. Der Kleber hat ausgehärtet hohe Steifigkeitswerte. Dadurch kann die Beeinflussung der Messungen vernachlässigt werden. Abbildung 4 stellt die Anregung im Subsystem 05 mit einem Mittelschweren Hammer dar.

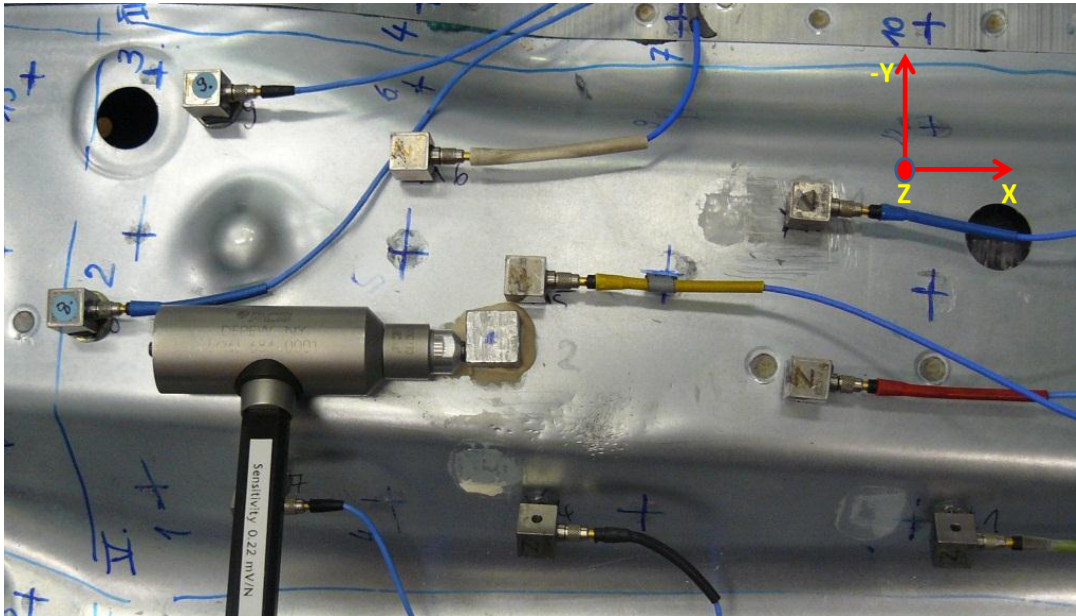


Abbildung 4 Anregung eines Messpunktes in Subsystem 05 in positiver X-Richtung mit Aluklotz

Wie in Abb. 4 zu sehen, werden die Raumrichtungen wie folgt eingeteilt. Die Z-Richtung ist die Normalenrichtung des Blechs. X gibt die Längsrichtung und Y die Querrichtung an. In [12] wird die Anbringung der Aufnehmer mit Montageplättchen zur Transformation des lokalen Koordinatensystems in ein Globales vorgeschlagen. Bei den hier aufgeführten Messungen wird auf Grund der Blechstruktur darauf verzichtet. Das bietet den Vorteil, dass kein zusätzliches Gewicht auf das System aufgebracht wird. Damit wird der Einfluss der Messapparatur reduziert.

An jedem Punkt werden je Raumrichtung fünf Schläge gemittelt und daraus die Antwortfunktion am Anregepunkt und acht weiteren Orten ermittelt. Daraus folgt:

- neun Anregepositionen
- neun Messorte
- drei Anregerichtungen
- drei Messrichtungen

$$N(FRF) = 9 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 3 = 729$$

Je Subsystem werden demnach 729 Antwortfunktionen ermittelt.

### 2.2.2 Ergebnisse Messung A

Angestrebt wurde die Anregung über einen Frequenzbereich von 200Hz bis 2kHz. Die Daten (Anhang 1) zeigen, dass diese Spanne mit dem Messaufbau nicht zu erreichen ist. Der Krafteintrag ist bis 2kHz nicht ausreichend konstant. Angenommen wird der aus [12] bekannte Erfahrungswert von 20dB Abfall für ausreichenden Energieeintrag. Je nach Anregerichtung bekommt man unterschiedlich gut Energie in das System hinein. Die Normalenrichtung Z ist durch die Blechstruktur und damit den ausweichenden/federnden Eigenschaften schwer anzuregen. In X ist ein konstanter Energieeintrag am besten möglich. Dazwischen liegt Y.

Die folgende Abbildung 5 stellt den Krafteintrag mit dem mittelschweren Impulshammer dar. Es zeigt, dass kein genügend konstanter Krafteintrag möglich ist. Der Abfall der eingebrachten Kraft über die Frequenz ist dabei zu stark. Aus diesem Grund wird in weiteren Messungen auf einen leichteren Hammer zurückgegriffen.

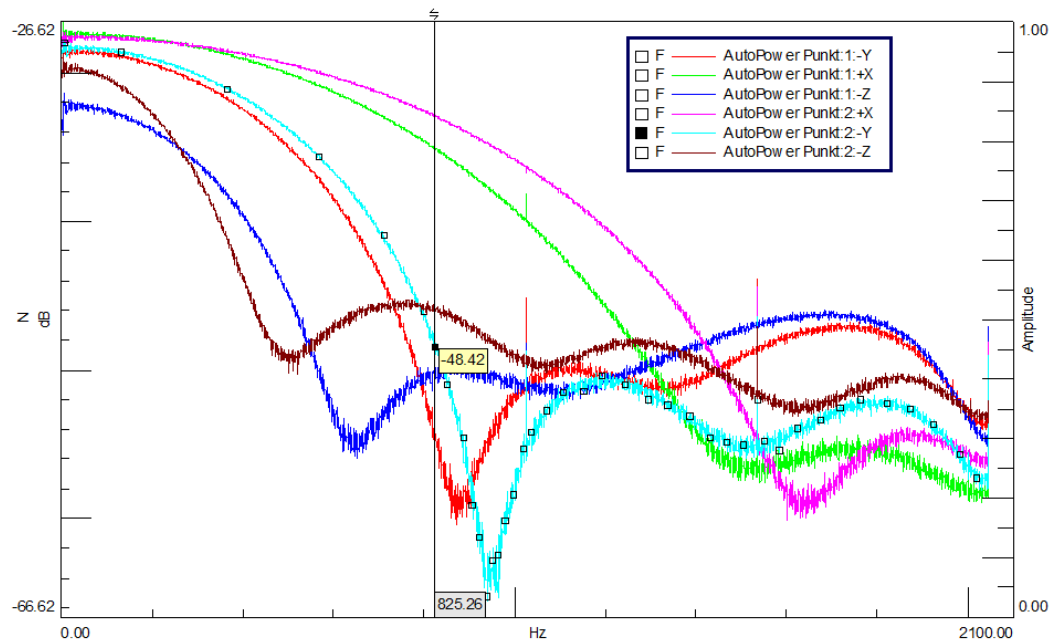


Abbildung 5 Krafteintrag mit mittelschwerem Impulshammer für alle Raumrichtungen an zwei Punkten

Bei Betrachtung der Kohärenz ergibt sich ein ähnliches Bild. In Z ist dabei eine gleichmäßige Anregung über mehrere Schläge nur sehr schwer möglich. X und Y zeigen dagegen sehr ähnliche Grenzbereiche. Diese Bereiche liegen im Durchschnitt bei ca. 900Hz.

Die Spitzen und Einbrüche der Leistungsspektren und Antwortfunktionen bei 512Hz, 1024Hz, 1535Hz und 2049Hz können nur durch Probleme der Messapparatur erklärt werden (Anhang 2 – 4).

Die Antwortfunktionen werden ab ca. 850Hz unscharf. Dieser Umstand wird mit dem leichteren Impulshammer beseitigt.

Bei Betrachtung der Antwortfunktionen der übrigen Richtungen unter Bezug auf die Anregerichtung werden, wie Tabelle 3 zeigt, klare Eigenschaften der Raumrichtungen sichtbar.

Z – Raumrichtung der geringsten dynamischen Steifheit	Ø Antwort Z in dB	14,0
Y – steifer als Z	Ø Antwort Y in dB	-1,7
X – Raumrichtung der größten Steifheit	Ø Antwort X in dB	-17,1

**Tabelle 3 Durchschnittliche Abstände der Antwortfunktionen zur Anregerichtung (Anhang 5 – 8)**

In Tabelle 3 werden die durchschnittlichen maximalen Abstände der Antwortfunktionen der Anregung einer Raumrichtung zu jeweils den beiden anderen Raumrichtungen dargestellt. Es zeigt die Eigenschaften der Struktur in Abhängigkeit der Anregerichtung. Die Antwort einer Raumrichtung bezieht sich auf die Abstände zu den jeweils anderen Richtungen, die angeregt worden sind. Dabei ist zu erkennen, dass die Normalenrichtung Z, wie zu erwarten war, eine hohe Nachgiebigkeit besitzt. X besitzt die höchste Steifheit und Y liegt dazwischen.

Ø Differenzen Z : X in dB	20,7
Ø Differenzen Z : Y in dB	10,5
Ø Differenzen Y : X in dB	10,3

**Tabelle 4 Differenzen der Antwortfunktionen zueinander**

Tabelle 4 zeigt die Differenzen der Antwortfunktionen der Raumrichtungen zueinander. Dabei betragen die Differenzen X:Y:Z jeweils ca. +10dB. Dies zeigt, unabhängig der Subsystemart, eine klare Richtungsabhängigkeit der Energieübertragung in der Bodenstruktur. Wobei in X – Richtung die höchste Steifheit gemessen wurde. Damit ist der Energiefluss in Längsrichtung am stärksten.

Um eine Reduzierung der Messdaten durchzuführen, wurden alle neun Messpunkte gemittelt und zufällige Auswahlen von drei bis acht Messpunkten getroffen. Die Tabellen (Anhang 9) zeigen, dass es ausreichend ist, über vier bis fünf Messpunkte zu mitteln. Das deckt sich

mit Erfahrungswerten, die aus Messungen im Vorfeld herrühren. Um genauere Informationen zu erhalten wurden für drei bis fünf Messpunkte weitere Mittelungen durchgeführt (Anhang 10 – 13).

	Ø X-Z; Sub01-Sub20 in dB
5 MP	1,9
4 MP	3,3
3 MP	3,8

Tabelle 5 Abweichung reduzierter Messpunkte bezogen auf neun MP

Tabelle 5 stellt die Durchschnittlichen Abweichungen der Antwortfunktionen gemittelt über alle drei Raumrichtungen und die vier betrachteten Subsysteme dar. Dabei ist zu erkennen, dass eine durchschnittliche Abweichung von 1,9dB für fünf Messpunkte (bezogen auf neun MP) entsteht. Diese Abweichung ist ein akzeptabler Wert. Bei dieser Betrachtung muss beachtet werden, dass nur größte Abstände der Antwortfunktionen untereinander analysiert wurden. Die Begrenzung auf fünf Messpunkte senkt die 729 *FRF's* auf 225 *FRF's*.

#### Zusammenfassung:

---

- Kohärenz und Krafteintrag begrenzt Frequenzbreite auf ca. 200 - 900Hz (mittelschwerer Hammer)  
➔ Verwendung leichter Hammer mit Stahlspitze
- Richtungsabhängigkeit der Bodenstruktur für Energieleitung
- fünf Messpunkte zum Beschreiben eines Subsystems ausreichend
- fünf MP reduzieren die Daten um ca. 70%

### 2.2.3 Vorgehen Messung B

Der nächste Schritt um neue Erkenntnisse zu erhalten, ist eine Messung über die zwei Subsysteme 01 und 05. Dafür sind fünf MP in jedem Subsystem verteilt worden. Hier wird erstmals der Energieübertrag von einem System in ein zweites vermessen. Um den angeregten Frequenzbereich der Messung A zu verbessern, ist außerdem ein leichter Impulshammer verwendet worden.

### 2.2.4 Ergebnisse Messung B

Die Kohärenzbetrachtung zeigt, dass die Wahl des leichteren Hammers einen großen Einfluss auf die Anregung hat. Dadurch verschiebt sich der Frequenzbereich abhängig von der Anregerichtung wie folgt:

(Anhang 14, 15)

#### Subsystem 01

- X: 300 – 1800Hz
- Y: 150 – 1500Hz
- Z: 100 – 1600Hz

#### Subsystem 05

- X: 250 – 1500Hz
- Y: 150 – 1700Hz
- Z: 100 – 1500Hz

Es zeigt sich also, dass die Grenzen für die Betrachtung für X bei 300Hz beginnen sollten und bis 1500Hz günstig sind. Für Y und Z ist die

Zielgrenze von 200Hz leicht zu erreichen und als Obergrenze können auch hier die 1500Hz bestätigt werden. Aufgrund der Rechnung und Mittelungen werden später die Terzen von 315Hz bis 1250 Hz verwendet.

In der Literatur werden verschiedene Messstrategien eingesetzt. Zum einen die Variante, das fünf Messpunkte in einem System gesetzt werden, aber nur an drei Punkten angeregt wird. Zum anderen lediglich ein Messpunkt und Anregepunkt in den Messsystemen. Bisherige Ergebnisse haben die zweite Variante für weitere Betrachtungen ausgeschlossen, da ein komplexes System nicht durch einen einzelnen Messpunkt repräsentiert werden kann. Außerdem bedingt die geringe Größe der Subsysteme eine höhere Messpunktflächendichte.

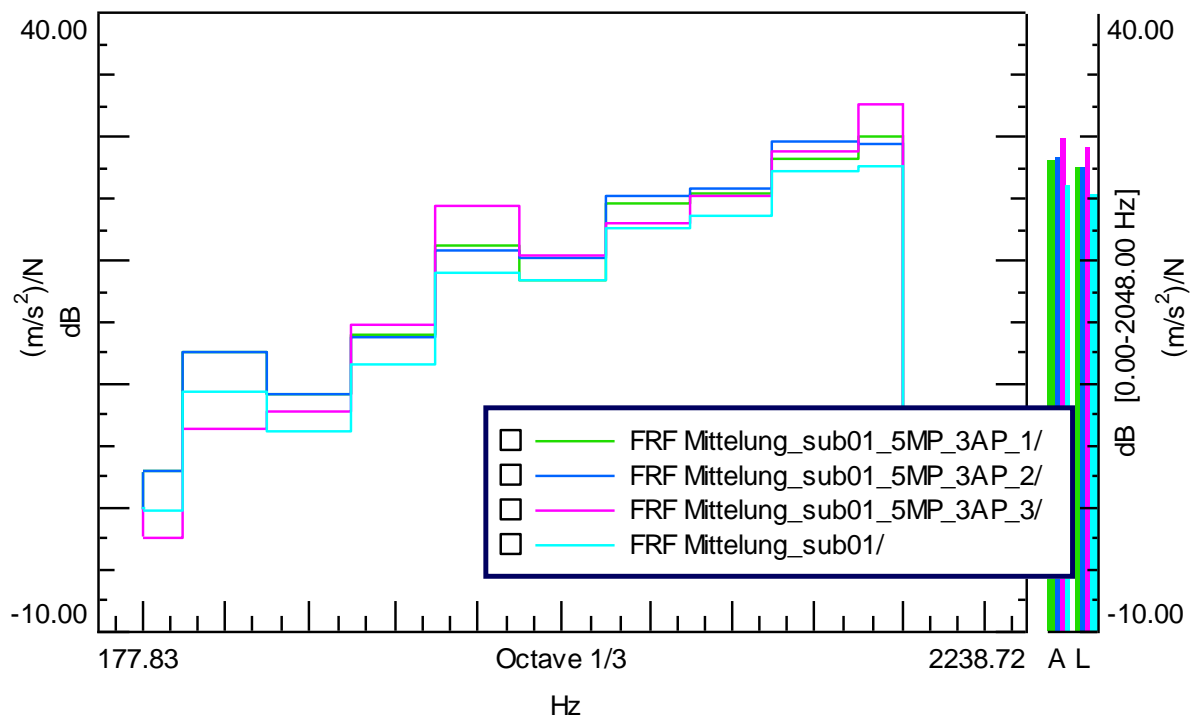


Abbildung 6 Gegenüberstellung der Strategien 5MP:5AP und 5MP:3AP

Abbildung 6 stellt die Messungen mit fünf MP und fünf AP, den Daten von fünf MP und drei AP gegenüber. Der Unterschied der Antwortfunktionen beträgt wenigstens 3dB.



Die Auflösung der Messungen in die verschiedenen Raumrichtungen zeigt folgendes:

Differenzen der Subsysteme in dB			
	X	Y	Z
Sub_01 : Sub_05	13,0	10,5	10,2
Sub_05 : Sub_01	11,5	7,2	7,4

Tabelle 6 Differenzen der Subsysteme zueinander bezogen auf die Anregung (Anhang 16)

Tabelle 6 stellt die Differenzen der beiden Subsysteme dar. Die erste Zeile zeigt die Differenz zwischen dem angeregten Subsystem 01 zum Referenzsystem 05, Zeile zwei dagegen die Anregung des Subsystem 05 und das Referenzsystem 01. Die Unterschiede der Messungen bestätigen die vorher festgestellte Richtungsabhängigkeit der Energieleitung in der Bodenblechstruktur. In X- Richtung wird dabei weniger Schwingungsenergie in das quer benachbarte Subsystem geleitet, als es bei Anregung in Y- oder Z- Richtung der Fall ist. Der Unterschied beträgt dabei ca. 3 – 4dB. Die Anregung in Y oder Z dagegen zeigt zueinander keinen Unterschied.

Es lässt sich dazu erkennen, dass das steifere Längsträgersubsystem leichter Energie in die umliegenden Systeme einträgt.

Zusammenfassung:

---

- Kohärenz begrenzt Auswertbare Terzen auf  $f_m = 315\text{Hz} \dots 1250\text{Hz}$
- Richtungsabhängigkeit der Bodenstruktur für Energieleitung
- fünf Anregpunkte sind günstiger als lediglich drei AP
- Steifes System trägt leichter Energie in benachbarte Systeme ein, als der Bodenblechbereich

## 2.3 Messstrategie

Die vorbereitenden Messungen liefern günstige Indikatoren für die Kriterien und Grenzen der tatsächlichen Messung. Um die SEA durchzuführen wird anhand der bestimmten Grenzen die zu betrachtende Struktur eingeteilt, angeregt und vermessen.

Die bisherige Aufteilung der Subsysteme wird weiterhin beibehalten, jedoch neu benannt. Die Messungen haben eine Richtungsabhängigkeit gezeigt, welche die Einteilung der Bodenstruktur in Bodenblechbereiche und Längsträgerbereiche bestätigen. Des Weiteren wird die Messung in jedem System an fünf Orten durchgeführt, an denen jeweils auch anzuregen ist. Für die SEA wird dazu jede mögliche Kombination der Subsysteme vermessen. Im Gegensatz zu anderen, bisher durchgeführten Arbeiten, wird an fünf Punkten in jedem Subsystem angeregt. In [2] wird lediglich an drei Punkten angeregt.

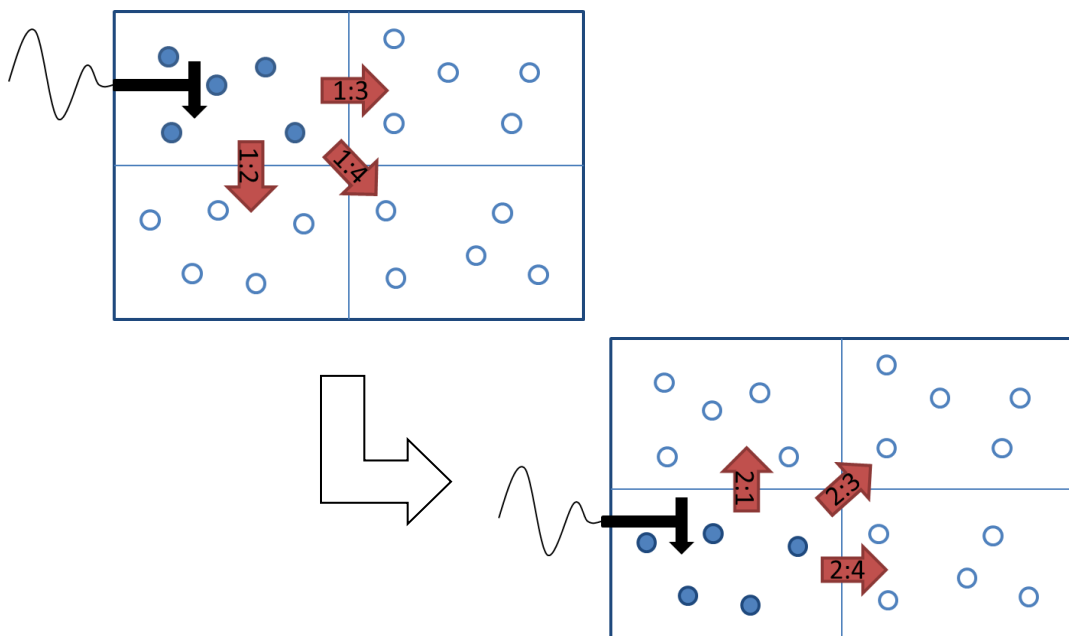


Abbildung 7 Darstellung des Subsystemwechsels der Anregung und der entstehenden Kombinationen der Antwortfunktionen

Auf Grund der begrenzten Zeit werden lediglich sechs Subsysteme des Bodenblechbereichs vermessen und ausgewertet. Die gewählten Subsysteme sind 01 – 06. Aufgrund der besseren Übersicht und Bezeichnungsnorm in Excel wurden die Subsysteme wie folgt neu benannt:

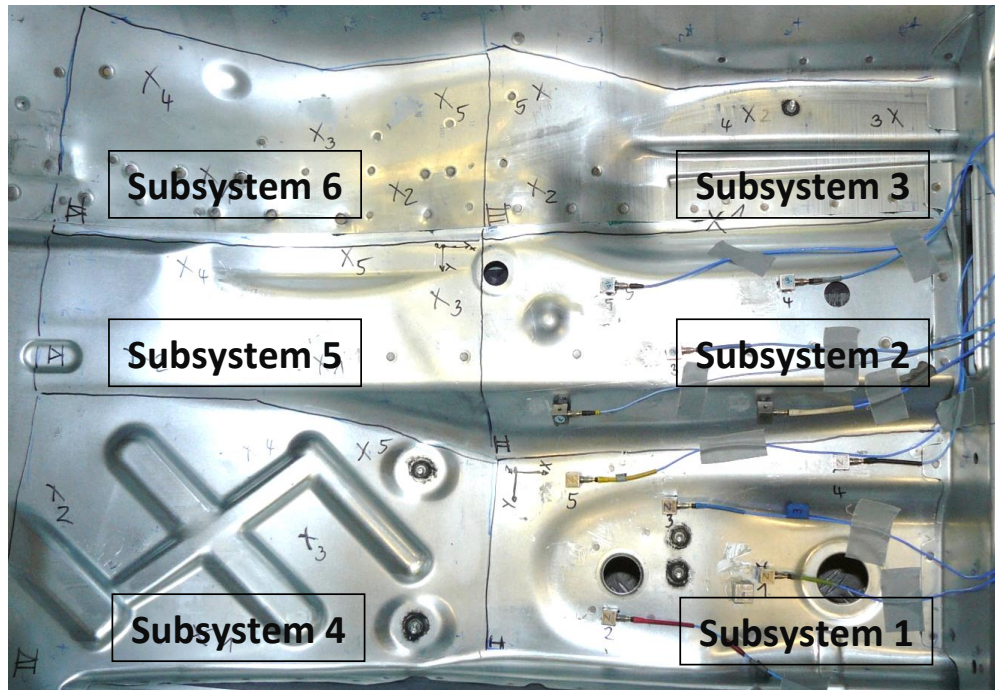


Abbildung 8 Neue Benennung der Subsysteme

Das verwendete Messsystem stellt 49 Kanäle zur Verfügung. Dabei werden 48 Kanäle für Beschleunigungsaufnehmer verwendet. Ein Kanal steht damit für die Messung der Anregung zur Verfügung.

Mit 48 Kanälen können somit 16 Aufnehmer in Subsystemen untergebracht werden. Bei der Messung werden drei Subsysteme mit jeweils fünf Messpunkten versehen. Eine Anregung findet dabei an allen Messpunkten statt. Der übrige Aufnehmer wird folgend eingesetzt, wenn die Systeme angeregt werden, in denen noch kein Messpunkt gesetzt ist. Dadurch kann eine Menge Zeit eingespart werden. Wenn alle sechs Subsysteme angeregt worden sind, werden die Aufnehmer versetzt, sodass die bisherigen freien Subsysteme mit jeweils fünf Messpunkten voll

besetzt sind. Die Messung wird Analog noch einmal durchgeführt. Damit sind alle möglichen Kombinationen vermessen.

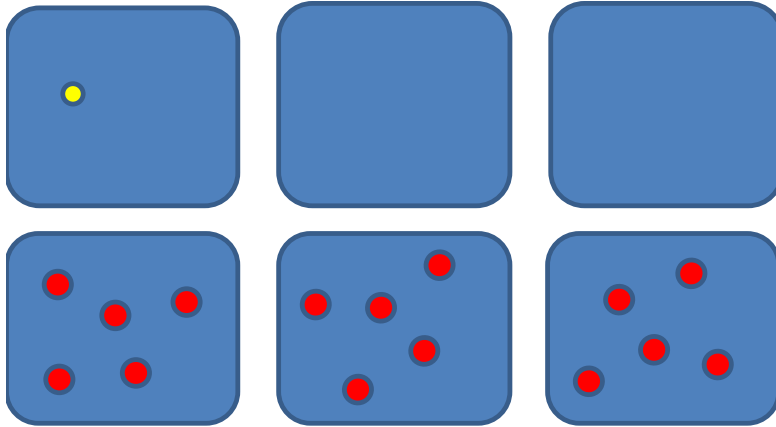


Abbildung 9 Setzen der Messpunkte

Ein geeigneter Zeitansatz ist, 30 Minuten je Messpunkt anzunehmen. Dabei werden drei Raumrichtungen angeregt und der Aluklotz neu aufgebracht. Damit sind 60 Anregungen  $\hat{=}$  30 Minuten durchzuführen. Daraus folgt, dass ca. 30 h Arbeitszeit zur Messung erforderlich sind. Um möglichst wenig Gewicht in die Systeme zu bekommen wird nur ein Aluklotz verwendet, der je Anregung versetzt wird.

Zur besseren breitbandigen Anregung wird ein leichter Impulshammer verwendet. Dieser bietet für die Messung die beste Anregemöglichkeit des Bleches. In Verbindung dazu, wird als Spitze ein Stahlaufsatz genutzt.

#### Zusammenfassung:

---

- Leichter Impulshammer mit Stahlspitze
- fünf Messpunkte und fünf Anregepunkte je Subsystem
- Alle Subsysteme Anregen und dann Messpunkte versetzen
- Je Messpunkt ca. 30 min. Zeitansatz
- ein Extra-Beschleunigungsaufnehmer für Anregung

## 2.4 Auswertung anhand zweier Subsysteme

Dieses Kapitel führt die Auswertung mit zwei der insgesamt sechs vermessenen Subsysteme durch. Dabei sollen die einzelnen Schritte näher betrachtet werden.

Nachdem die Messung durchgeführt ist, wird im nächsten Schritt die Kohärenz und der Krafteintrag der Messungen in LMS geprüft. Falls hier die vorher festgelegten Grenzen verletzt werden, müssen diese angepasst werden.

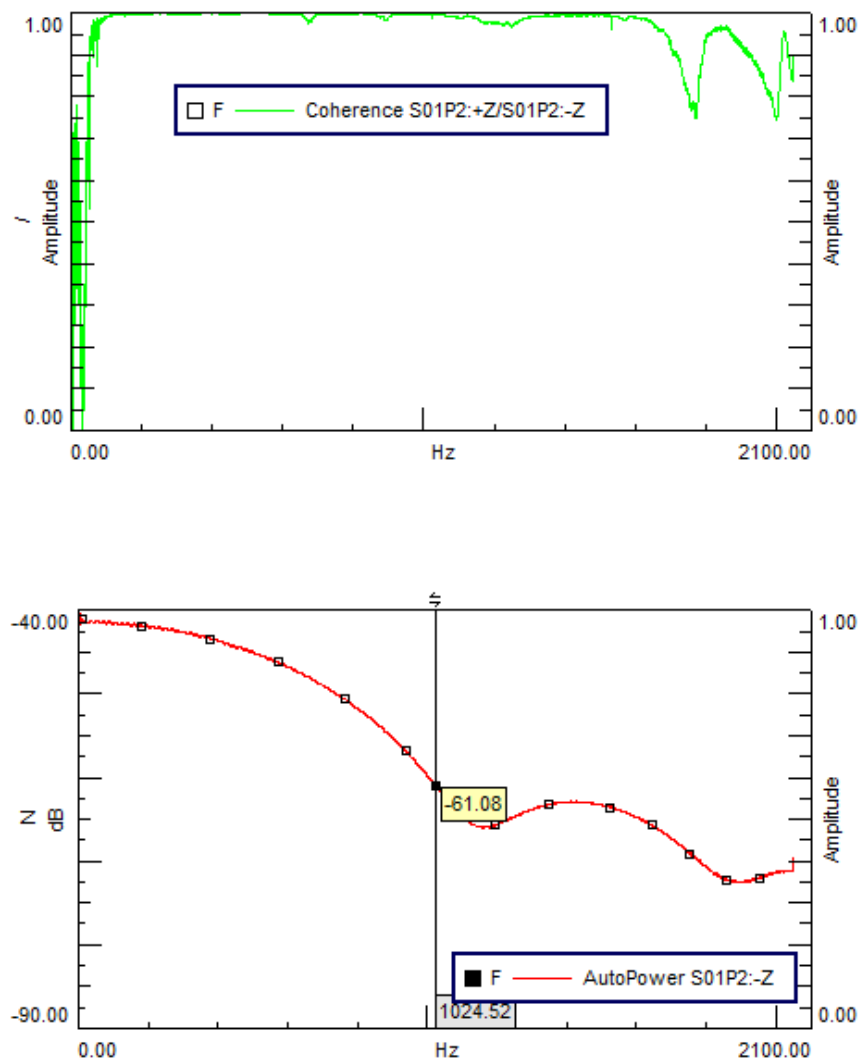


Abbildung 10 Darstellung der Kohärenz und des Krafteintrages

Die Bilder zeigen beispielhaft, dass die Kohärenz in diesem Fall die vorhergesetzten Grenzen nicht weiter beschränkt. Der Krafteintrag setzt jedoch die obere Grenze hier auf ca. 1000Hz herab.

Mit einer geeigneten Benennung der Messdaten, müssen diese in das Universalfile – Format exportiert werden. Dabei muss beachtet werden, dass die Bezeichnungen der Anregeorte und Messorte nicht mehr als neun Zeichen betragen darf [13]. Für die hier vorliegenden Messungen wurden fünf Zeichen verwendet (Bsp.: S01P2).

Mit einem Makro werden diese Daten in MS–Excel eingelesen. Dabei sollen die Datensätze je Punkt, in Terzen und zusätzlich in den drei Raumrichtungen gemittelt werden. Daraus ergibt sich eine erhebliche Reduzierung der Datenmenge.

Bsp.: Anhand von zwei Subsystemen, Mittelung über drei Raumrichtungen, fünf Anregepunkten und fünf Messpunkten und einer Abtastrate von 4096.

Daraus ergeben sich:

$$4096 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 2 = 614.400$$

Die Rohdaten belaufen sich somit auf 614.400 Wertepaare, jeweils als Imaginär und Realteil.

Für die Reduzierung wird über 24 Terzen (bis 10Hz ... 2000Hz) und die drei Raumrichtungen gemittelt.

$$24 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 2 = 1200$$

Durch die Mittelungen entstehen für den Eintrag in eine Excel – Tabelle lediglich noch 1200 Wertepaare. Damit ergibt sich eine Reduzierung von 1:512.

Anhand der Grenzen, werden jetzt die interessierenden Terzen ausgewählt, wodurch sich der Rechenaufwand noch einmal reduziert.

Um die Berechnungen durchführen zu können, müssen die Massen der Subsysteme bestimmt werden. Diese können aus einem FEM – Modell heraus ermittelt werden. Dazu wird das betreffende Subsystem freigeschnitten und die Software berechnet die dazugehörige Masse.

Im folgenden Schritt werden die Schwingungsenergien des Subsystems  $j$  bei Anregung in  $i$  und der Leistungseintrag in  $i$  nach den Formeln (1.2) und (1.3) berechnet. Tabelle 7 stellt die Schwingungsenergie in den Subsystemen 1 und 2 dar:

Subsystem		Terzmittenfrequenz					
Mess.	Anreg.	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz
1	1	2,74E+00	8,26E+01	3,52E+02	5,89E+02	4,37E+04	2,97E+05
1	2	2,04E-02	4,54E+00	2,15E+01	2,52E+01	6,74E+02	3,89E+03
2	1	2,17E-01	1,09E+02	5,68E+02	1,23E+03	1,83E+03	3,26E+03
2	2	1,04E+01	3,38E+02	6,75E+02	2,10E+04	4,40E+05	7,64E+05

Tabelle 7 Schwingungsenergien in den Subsystemen 1 und 2

Die zugehörigen eingetragenen Leistungen in den angeregten Systemen sind in Tabelle 8 zu sehen:

P im Subs.	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz
1	9,02E-02	3,83E-01	1,04E+00	1,09E+00	3,09E+00	3,94E+00
2	7,85E-02	5,93E-01	9,47E-01	1,84E+00	3,79E+00	4,24E+00

Tabelle 8 Leistungseintrag bei Anregung in Subsystem 1 und 2

Es folgt eine Normierung der Schwingungsenergien zu  $\underline{E}^n$  nach (1.4).  
 Diese sind in Tabelle 9 zu finden:

315Hz	1	2	630Hz	1	2
1	6,01E+04	5,14E+02	1	2,14E+06	5,42E+04
2	4,76E+03	2,62E+05	2	4,45E+06	4,51E+07

400Hz	1	2	800Hz	1	2
1	5,42E+05	1,92E+04	1	7,09E+07	8,94E+05
2	7,12E+05	1,43E+06	2	2,97E+06	5,84E+08

500Hz	1	2	1000Hz	1	2
1	1,06E+06	7,13E+04	1	4,74E+08	5,76E+06
2	1,71E+06	2,24E+06	2	5,20E+06	1,13E+09

Tabelle 9 Darstellung der normierten Energien

Die Lösung des sich ergebenden Gleichungssystems je Terz nach (1.5) durch die Invertierung der normierten Energiematrix ist in Tabelle 10 aufgezeigt.

315Hz	1	2	630Hz	1	2
1	1,66E-05	-3,27E-08	1	4,68E-07	-5,62E-10
2	-3,03E-07	3,82E-06	2	-4,62E-08	2,22E-08

400Hz	1	2	800Hz	1	2
1	1,88E-06	-2,52E-08	1	1,41E-08	-2,16E-11
2	-9,33E-07	7,10E-07	2	-7,17E-11	1,71E-09

500Hz	1	2	1000Hz	1	2
1	9,95E-07	-3,17E-08	1	2,11E-09	-1,07E-11
2	-7,60E-07	4,71E-07	2	-9,69E-12	8,83E-10

Tabelle 10 Leistungseintrag bei Anregung in Subsystem 1 und 2

Daraus werden mit (1.6) nun die Kopplungsverlustfaktoren ( $\eta_{i,j}$ ) und mit (1.7) die Dämpfungsverlustfaktoren ( $\eta_{i,i}$ ) berechnet. Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse.



315Hz	1	2	630Hz	1	2
1	1,63E-05	3,03E-07	1	4,22E-07	4,62E-08
2	3,27E-08	3,79E-06	2	5,62E-10	2,16E-08

400Hz	1	2	800Hz	1	2
1	9,45E-07	9,33E-07	1	1,40E-08	7,17E-11
2	2,52E-08	6,85E-07	2	2,16E-11	1,69E-09

500Hz	1	2	1000Hz	1	2
1	2,35E-07	7,60E-07	1	2,10E-09	9,69E-12
2	3,17E-08	4,39E-07	2	1,07E-11	8,73E-10

Tabelle 11 Verlustfaktoren in Subsystemen 1 und 2

Es folgt eine grafische Aufarbeitung der Daten, die eine übersichtlichere Darstellung bietet und Energieflusswege aufzeigt. Dazu sollen farbliche Abstufungen die Verlustfaktoren optisch klarer werden lassen.

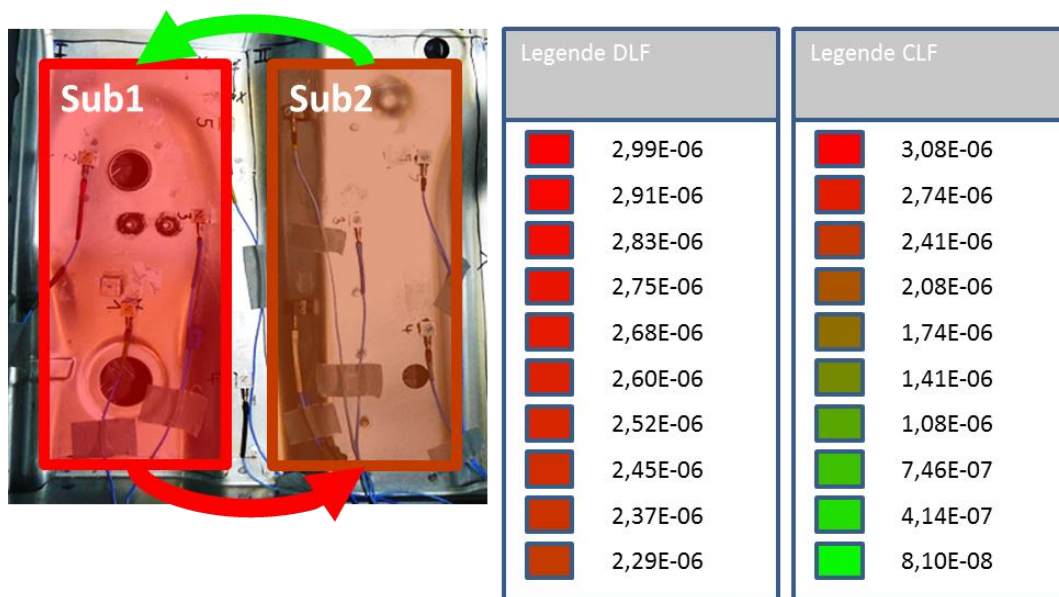


Abbildung 11 Grafische Darstellung der 400Hz Terz mit DLF und CLF für 2 Subsysteme

Abbildung 11 zeigt eine Möglichkeit der Darstellung. Die Rechtecke zeigen dabei die Dämpfungsverlustfaktoren der Systeme und die Pfeile die Richtung und Größe der Kopplungsverlustfaktoren. Die Farbskala repräsentiert von Rot nach Grün kleiner werdende Verlustfaktoren. Je

kleiner die Verlustfaktoren, desto besser funktioniert der Energieaustausch, bzw. desto weniger Energie ist in einem Subsystem. Je größer der DLF in einem Subsystem ist, desto mehr Energie fließt heraus. Dazu zählt die Abstrahlung in den freien Raum, Energieverluste durch Umwandlung der Schwingungsenergie in Wärme und Energieflüsse in benachbarte Systeme.

#### Zusammenfassung:

---

- Überprüfen der Messwerte und Grenzen
- Richtige Benennung der Messdaten und UFF-Datei erstellen
- Daten einlesen und reduzieren
- Daten Sortieren
- Berechnungen der SEA durchführen

## 2.5 Messergebnisse und Diskussion

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Grenzen und Vorgehensweisen dieser Arbeit erläutert. Das abschließende Kapitel stellt die Messergebnisse über alle sechs vermessenen Subsysteme genauer dar, ohne nochmals auf die Rechnungen und Randbedingungen einzugehen.

Abbildungen und Tabellen sind jeweils nur ausgewählte Beispiele. Die gesamten Daten sind im Anhang und auf dem beigefügten Datenträger zu finden.

315Hz	1	2	3	4	5	6
1	5,26E-05	1,01E-06	1,04E-07	8,66E-07	1,57E-07	8,52E-07
2	1,10E-07	1,28E-05	3,20E-09	-2,96E-10	6,02E-09	1,53E-08
3	4,99E-07	1,20E-08	8,92E-05	-2,38E-09	1,72E-08	1,31E-07
4	1,98E-06	-1,99E-08	4,92E-09	5,51E-05	1,71E-07	-7,97E-09
5	2,34E-08	4,34E-08	2,16E-08	1,64E-08	1,73E-04	1,08E-07
6	1,89E-08	8,85E-09	3,08E-08	5,56E-09	3,56E-08	4,69E-04

1000Hz	1	2	3	4	5	6
1	6,69E-09	3,16E-11	2,50E-13	3,32E-10	1,37E-12	2,47E-13
2	3,59E-11	2,91E-09	3,07E-11	4,87E-12	6,83E-12	1,22E-13
3	4,83E-12	8,08E-11	5,07E-09	2,65E-13	1,13E-12	7,64E-12
4	3,53E-10	2,19E-11	1,75E-12	1,24E-08	4,80E-12	2,07E-13
5	5,68E-11	2,04E-10	1,59E-11	8,49E-12	2,19E-09	2,06E-12
6	1,15E-11	3,59E-11	7,04E-12	8,53E-12	1,57E-11	2,23E-08

Tabelle 12 Verlustfaktoren ausgewählter Terzen über 6 Subsysteme (weitere im Anhang 17 – 20)

Tabelle 12 stellt die ermittelten Verlustfaktoren in Matrixform dar. Bei einem Vergleich der Werte mit den Ergebnissen der Auswertung über zwei Subsysteme stimmen diese nicht überein. Dies ist ein rechnerischer Effekt, der auf die Invertierung der Energiematrizen zurückzuführen ist. Durch die variierende Anzahl der Ausgewerteten Subsysteme ändert sich die Determinante der Matrizen, die zur Invertierung nötig ist. Damit

weichen die Werte voneinander ab, sind aber in derselben Größenordnung.

Die Verlustfaktoren der begrenzenden Terzen zeigen außerdem, dass bei hohen Frequenzen die Verlustfaktoren mehrere Zehnerpotenzen kleiner sind, als bei niedrigen Frequenzbereichen. Dieser Effekt ist auch schon bei anderen Messungen aufgefallen, bewegt sich da aber in wesentlich kleineren Bereichen von ca. zwei bis drei Zehnerpotenzen. Dazu sind diese oberhalb der 315Hz Terz weit entfernt von den erwarteten Verlustfaktoren. Diese müssten im Bereich von  $10^{-2}$  bis  $10^{-5}$  liegen. Die Größenordnung ist charakteristisch für Stahl [14].

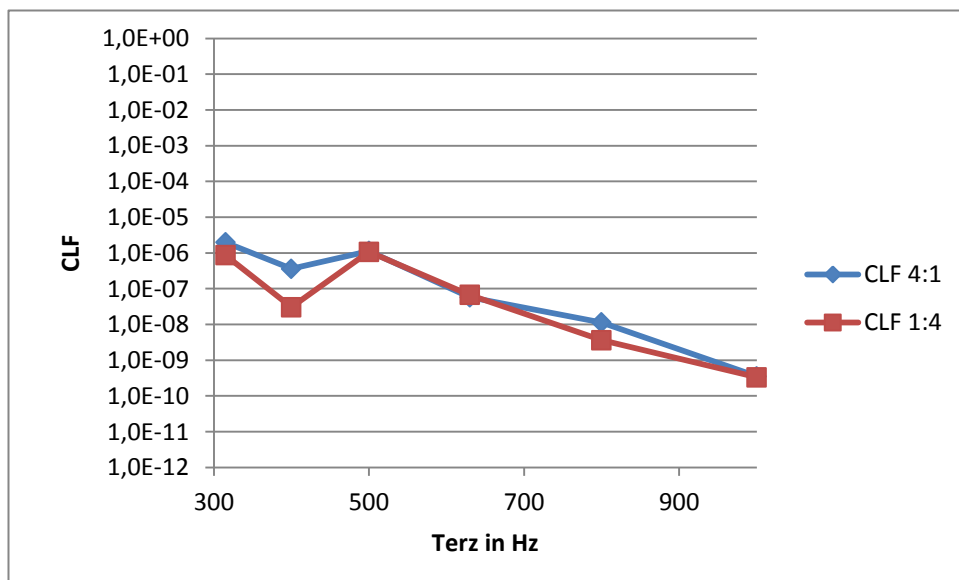


Diagramm 1 Verlustfaktoren der Subsysteme 1 und 4 über die Terzen

Diagramm 1 stellt die Verlustfaktoren zwischen den Subsystemen 1 und 4 über die Terzen von 315Hz bis 1000Hz dar. Der gesamte Verlustfaktorbereich liegt bei allen möglichen Kopplungen zwischen drei bis sechs Zehnerpotenzen.

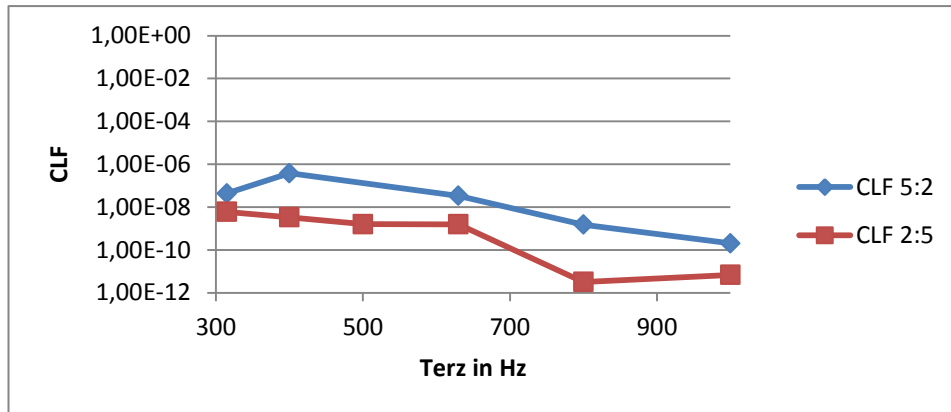


Diagramm 2 Verlustfaktoren zwischen den Subsystemen 2 und 5

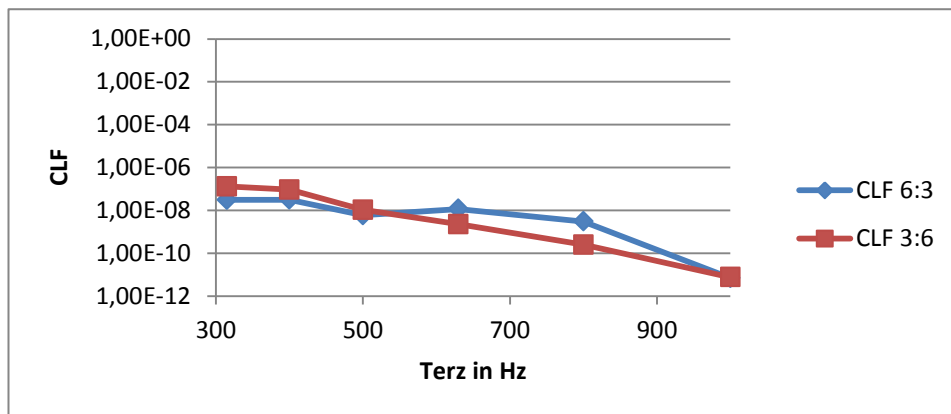


Diagramm 3 Verlustfaktoren zwischen den Subsystemen 3 und 6

Weiterhin zeigen die Subsysteme in X-Richtung des Fahrzeugs Unterschiede. Dabei wird ersichtlich, dass die Übertragung zwischen Subsystem 1 und Subsystem 4 den schlechtesten Energieaustausch hat. Die beiden anderen Subsystemkombinationen in X-Richtung sind in ähnlichen Größenordnungen. Der Längsträgerbereich weist aber als einziger einen klaren Unterschied zwischen negativer und positiver X-Richtung auf. Erklärbar ist dies dadurch, dass aus dem Subsystem 5 mehr Energie in die quer benachbarten Systeme abfließt. Dazu ist zu bemerken, dass die Systeme 4, 5 und 6 verdeckt mit einem Querträger verbunden sind. Die Systeme 1, 2 und 3 jedoch nicht.

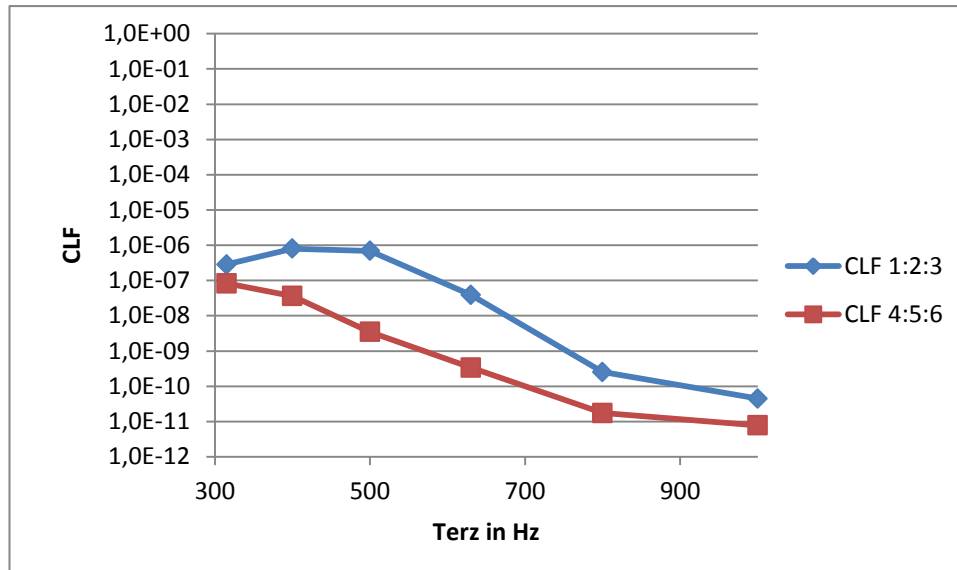


Diagramm 4 Verlustfaktoren zwischen den Subsystemen 1:2:3 und 4:5:6 gemittelt

Um die Datenanalyse zu verdeutlichen stellt Diagramm 4 die Mittelung der Kopplungsverlustfaktoren zwischen den Systemen 1, 2 und 3 den Systemen 4, 5 und 6 gegenüber. Dabei wurden nur die direkten Kopplungen betrachtet. Es zeigt deutlich, dass zwischen den Subsystemen 4, 5 und 6 ein besserer Energieaustausch stattfindet.

Die Messdaten weisen deutliche Abweichungen zu den erwarteten Werten auf. Dies kann daran liegen, dass keine ausreichenden Struktursprünge im Bereich der Kopplungen liegen. Außerdem sind die Subsystemgrößen für diese Messungen wesentlich kleiner gewählt worden, als es bei bisherigen Messungen der Fall ist. Durch eine höhere Messpunktlächendichte wird die mittlere Energie in einem Subsystem möglichst genau vermessen. Als Effekt zeigte sich, dass das Problem mit den negativen Verlustfaktoren erheblich verbessert wurde. Ein weiterer Grund dafür ist die Art der Anregung. Im Gegensatz zu anderen Messungen wurde an allen Messpunkten auch angeregt. Dies ist ein erfolgreicher Schritt zu verbesserten Ergebnissen. Abweichend vom allgemein positiven Trend ist jedoch die 500Hz Terz, die sich nicht sichtlich verbessert hat (Tabelle 13). Dies hat sich bei vorbereitenden Messungen bereits angedeutet.

500Hz	1	2	3	4	5	6
1	1,30E-07	2,62E-06	-2,95E-09	1,08E-06	-7,72E-09	-5,27E-08
2	7,91E-08	1,40E-06	4,74E-09	6,77E-08	1,61E-09	3,08E-08
3	7,91E-09	5,59E-08	1,96E-06	-3,92E-09	3,73E-10	1,06E-08
4	1,13E-06	-2,12E-07	7,12E-09	1,76E-06	1,82E-08	3,55E-08
5	8,83E-08	-4,28E-09	7,43E-09	-1,10E-08	2,85E-06	6,00E-09
6	4,95E-09	1,79E-08	5,95E-09	-1,06E-09	8,69E-10	1,52E-05

Tabelle 13 Verlustfaktoren der 500Hz Terz

Dabei ist kein besonderer Zusammenhang zu erkennen, weswegen diese negativen Verlustfaktoren entstehen. 1:3, 1:6, 3:4 und 4:6 sind nicht direkt gekoppelte Systeme. 1:5 und 2:4 sind diagonal gekoppelt. Die Subsysteme 2:5 und 4:5 sind direkt gekoppelt. Eine strukturelle Beziehung kann daher ausgeschlossen werden. Außerdem ist es schwer negative Verlustfaktoren physikalisch zu deuten. Mögliche Ansätze wären ein umgekehrter Energiefluss oder Resonanzen. Im Falle der Resonanz, wäre eine Grundlage der SEA ausgehebelt, da das Blech mit einem diffusen Schallfeld keine Resonanzspitzen aufweist. Durch einige Impedanzunterschiede und sehr klein gewählte Subsysteme kann dieser Fall nicht ausgeschlossen werden.

Da vor allem die niedrigen Verlustfaktoren nicht zufriedenstellend sind, werden die unterteilten Subsysteme von sechs auf zwei zusammengefasst. Somit bilden die Subsysteme 1, 2 und 3 ein Teilsystem und 4, 5 und 6 ein zweites. Die Systeme sind somit mit 15 Beschleunigungsaufnehmern vermessen worden. Nachdem die Rechnung durchgeführt wurde ergibt sich ein etwas verbessertes Bild, als es 6 Subsysteme dargestellt haben. Die Verlustfaktoren sind weiterhin selten negativ, was die Durchführung der Messung unterstützt. Die Verlustfaktoren haben sich im Durchschnitt um ca. eine Zehnerpotenz vergrößert (Anhang 21). Das lässt den Schluss zu, dass man bei größeren Systemen auch höhere Verlustfaktoren erwarten kann. Somit haben die Dimensionen der Subsysteme einen Einfluss auf die Ergebnisse und müssen bei der Vergleichbarkeit beachtet werden.

Die Grafische Lösung zur besseren Übersichtlichkeit ist so gestaltet, das sie individuell angepasst werden kann. (Abb. 12)

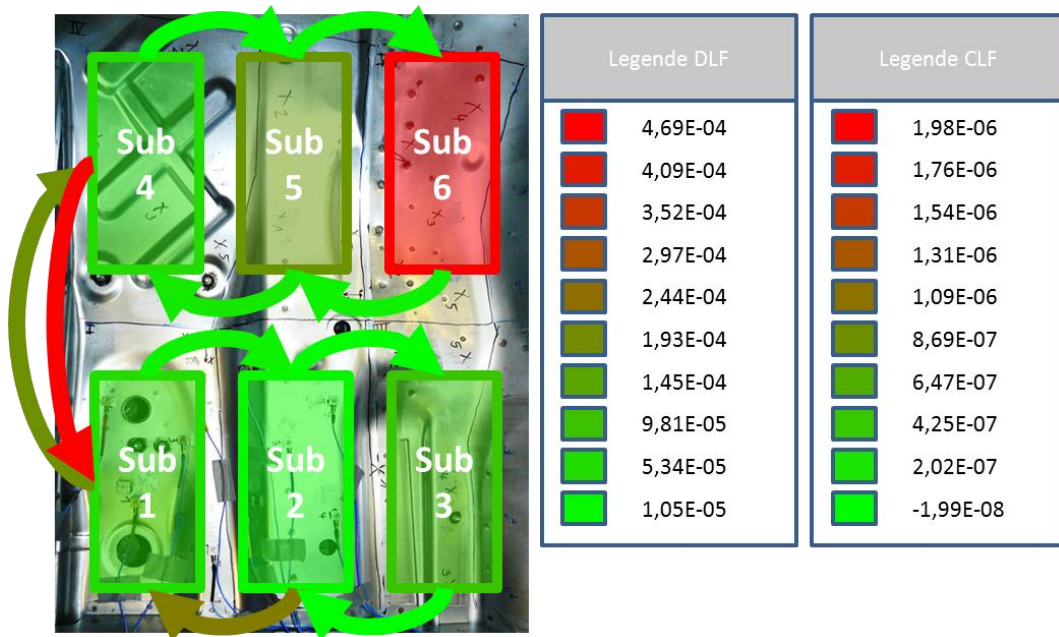


Abbildung 12 Grafik 6 Subsysteme 315Hz Terz (weitere Grafiken: Anhang 22 – 26)

Die beispielhafte Darstellung der 315Hz Terz zeigt hohe Verlustfaktoren in den Subsystemen 5 und 6 und zwischen den Systemen 2:1, 1:4 und 4:1. Die nicht eingetragenen CLF halten sich in sehr geringen Bereichen auf. Über alle Terzen auffällig ist, dass Subsystem 6 einen hohen Energiegehalt im Vergleich zu den restlichen Systemen hat. Außerdem ist der Energieaustausch zwischen den Subsystemen 1 und 4 gedämpfter, als zwischen anderen. Deutlich sichtbar ist, dass die Verlustfaktoren in manchen Systemen je Terz unterschiedlich sind. Diese Frequenzabhängigkeit ist eine Folge der komplexen Struktur des Gesamtsystems. Bei hohen Frequenzen findet der Energieaustausch zwischen Subsystem 2 und 1 auf einem Niveau mit den restlichen Systemen statt. Bei tiefen Frequenzen gibt es jedoch einen klar gedämpften Austausch.



### 3 Fazit

Es hat sich gezeigt, dass die Art der Messung einen positiven Einfluss auf die Verlustfaktoren hat. Es sind wesentlich weniger negative und damit schwer erklärbare Kopplungsverlustfaktoren aufgetreten. Es sollte also in zukünftigen Messungen die Anzahl der Punkte angeregt werden, die auch gemessen werden.

Der Aufwand für diese Messungen ist enorm. Wenn eine ganze Fahrzeugkarosserie vermessen werden soll steigt der zeitliche Aufwand so stark, dass es unwirtschaftlich wäre sie auf die gesamte Struktur anzuwenden. Über kleinere Gebiete macht es dagegen Sinn, diesen Aufwand zu betreiben. Wenn über einen größeren Bereich gemessen wird, werden auch Energieflüsse besser sichtbar, als es bei lediglich sechs Subsystemen der Fall ist.

Die sehr geringen Verlustfaktoren sind unerfreulich, da sie nicht mit bisherigen Erfahrungen übereinstimmen. Die Erweiterung der Subsysteme hat aber den Schluss zugelassen, dass die Ausdehnung der Subsysteme Einfluss auf die Verlustfaktoren haben kann. Um hier sichere Ergebnisse zu erhalten, sollte genauer untersucht werden, was bei einer Verkleinerung der Subsysteme geschieht. Dies könnte so ablaufen, dass zuerst zwei große Systeme auf einem Stahlblech vermessen werden. Diese werden mehrfach unterteilt, und jeweils neu gemessen. Daraus lässt sich das Verhalten der Verlustfaktoren erkennen, wenn die Subsysteme verkleinert werden. Es könnte weiteren Aufschluss darüber geben, wie klein Subsysteme tatsächlich gewählt werden dürfen. Dazu könnten gezielt Sicken und verschiedene Arten der Fügung eingebracht werden um auch hier zu besseren Erkenntnissen zu kommen.

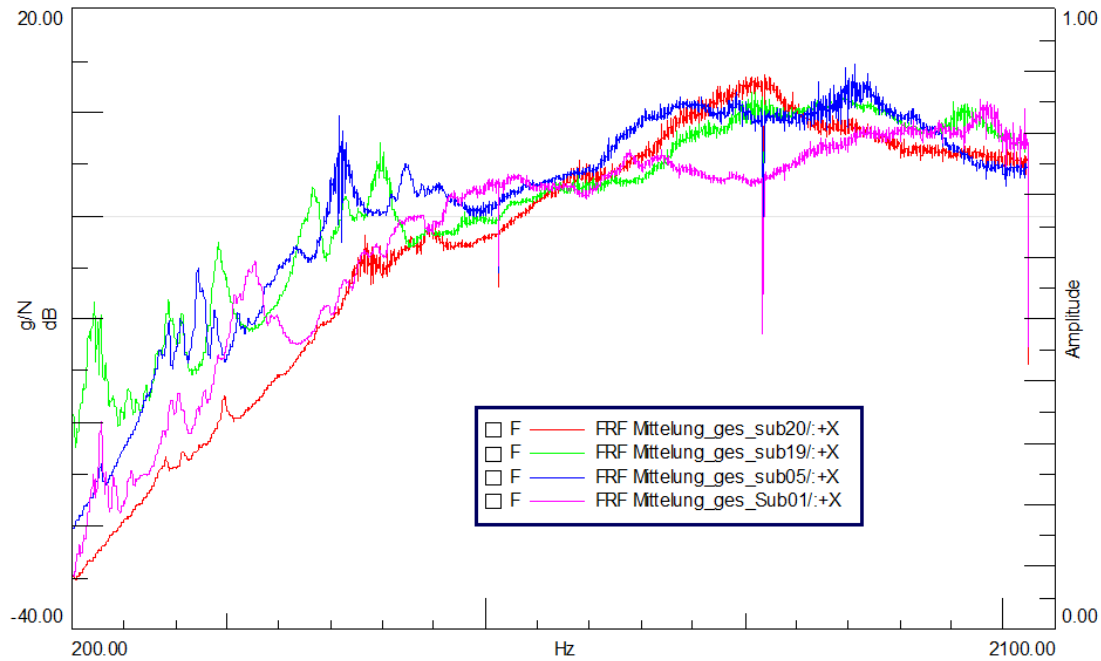
Bei den in dieser Arbeit gemachten Messungen ist eine sehr komplexe Struktur mit verschiedenen Fügungen und Versteifungen eingeteilt worden. Klare Eigenschaften konnten dabei aus den Ergebnissen heraus nur bedingt zugewiesen werden.

Die gefundene grafische Lösung ist eine gute, übersichtliche und vor allem individuell anpassbare Möglichkeit der Darstellung. Auffälligkeiten werden damit schnell offensichtlich. Bei größeren Systemen wird das Anpassen der Grafik eine zeitaufwendige Arbeit. Sie stellt Energieflusswege dann jedoch übersichtlich dar.

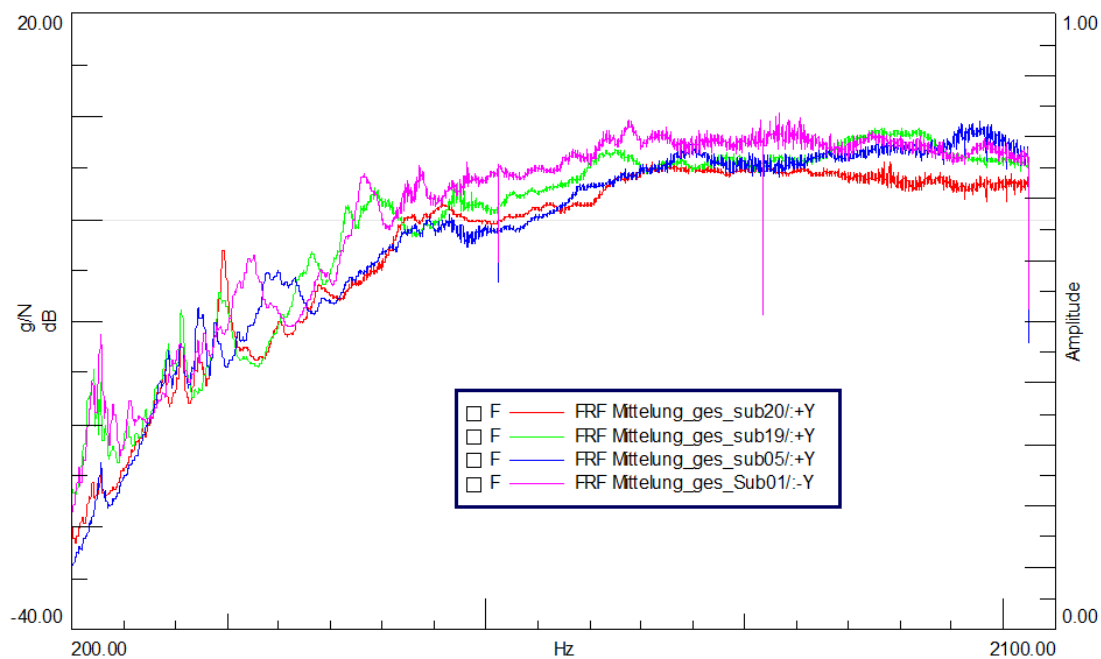
## Anhang

Subsystem 01:	Grenzfrequenz in Hz		Grenzfrequenz in Hz		Grenzfrequenz in Hz
Punkt_1_+X 1;	1000	Punkt_1_-Y;	800	Punkt_1_-Z 1	700
Punkt_2_+X;	1400	Punkt_2_-Y 1;	900	Punkt_2_-Z 2	600
Punkt_3_-X 1;	700	Punkt_3_-Y;	800	Punkt_3_-Z 1	500
Punkt_4_+X 1;	900	Punkt_4_-Y 1;	900	Punkt_4_-Z	700
Punkt_5_+X 1;	1000	Punkt_5_-Y 1;	500	Punkt_5_-Z	500
Punkt_6_+X 1;	1200	Punkt_6_+Y;	1200	Punkt_6_-Z 2	600
Punkt_7_+X;	700	Punkt_7_+Y 1;	800	Punkt_7_-Z	700
Punkt_8_-X;	1300	Punkt_8_+Y 1;	900	Punkt_8_-Z	600
Punkt_9_-X;	900	Punkt_9_-Y 1;	1000	Punkt_9_-Z	500
Ø	1011	Ø	867	Ø	600
Subsystem 05:	Grenzfrequenz in Hz		Grenzfrequenz in Hz		Grenzfrequenz in Hz
Punkt_1_+X 1;	900	Punkt_1_+Y 1;	1500	Punkt_1_-Z 1	500
Punkt_2_+X 1;	1300	Punkt_2_-Y;	1300	Punkt_2_-Z	1000
Punkt_3_+X 1;	700	Punkt_3_+Y;	800	Punkt_3_-Z	600
Punkt_4_-X;	800	Punkt_4_+Y;	900	Punkt_4_-Z 2	1500
Punkt_5_+X 1;	1900	Punkt_5_-Y 1;	1300	Punkt_5_-Z 1	1500
Punkt_6_-X;	700	Punkt_6_-Y;	700	Punkt_6_-Z 1	600
Punkt_7_+X 1;	800	Punkt_7_+Y;	1100	Punkt_7_-Z	700
Punkt_8_-X;	1200	Punkt_8_+Y;	1000	Punkt_8_-Z	1500
Punkt_9_+X;	1000	Punkt_9_-Y 2;	700	Punkt_9_-Z 1	500
Ø	1033	Ø	1033	Ø	933
Subsystem 19:	Grenzfrequenz in Hz		Grenzfrequenz in Hz		Grenzfrequenz in Hz
Punkt_4_+X;	500	Punkt_4_+Y;	1900	Punkt_4_-Z	900
Punkt_5_-X;	1200	Punkt_5_+Y;	700	Punkt_5_-Z	600
Punkt_6_+X;	900	Punkt_6_-Y;	700	Punkt_6_-Z	600
Punkt_7_+X;	1200	Punkt_7_+Y;	700	Punkt_7_-Z	1900
Punkt_8_-X 1;	800	Punkt_8_+Y;	700	Punkt_8_-Z 2	700
Punkt_9_+X;	700	Punkt_9_-Y;	500	Punkt_9_-Z 1	600
Punkt_10_+X;	500	Punkt_10_+Y;	1300	Punkt_10_+Z	700
Punkt_11_+X 1;	400	Punkt_11_+Y;	1000	Punkt_11_-Z 1	900
Punkt_12_+X 1;	1400	Punkt_12_-Y;	900	Punkt_12_-Z 1	1000
Ø	844	Ø	933	Ø	878
Subsystem 20:	Grenzfrequenz in Hz		Grenzfrequenz in Hz		Grenzfrequenz in Hz
Punkt_1_+X 1;	1500	Punkt_1_+Y;	1400	Punkt_1_-Z 1	900
Punkt_2_+X;	1400	Punkt_2_+Y;	1300	Punkt_2_-Z 1	900
Punkt_3_+X;	800	Punkt_3_+Y 1;	1200	Punkt_3_-Z	1000
Punkt_4_+X 1;	800	Punkt_4_-Y;	1300	Punkt_4_-Z	1000
Punkt_5_+X 1;	600	Punkt_5_-Y;	600	Punkt_5_-Z	800
Punkt_6_+X;	900	Punkt_6_+Y 1;	1100	Punkt_6_-Z 1	1500
Punkt_7_+X;	800	Punkt_7_-Y;	1500	Punkt_7_-Z 1	800
Punkt_8_+X;	600	Punkt_8_-Y;	800	Punkt_8_-Z 2	1100
Punkt_9_+X;	1100	Punkt_9_-Y 1;	900	Punkt_9_-Z 1	1300
Ø	944	Ø	1122	Ø	1033

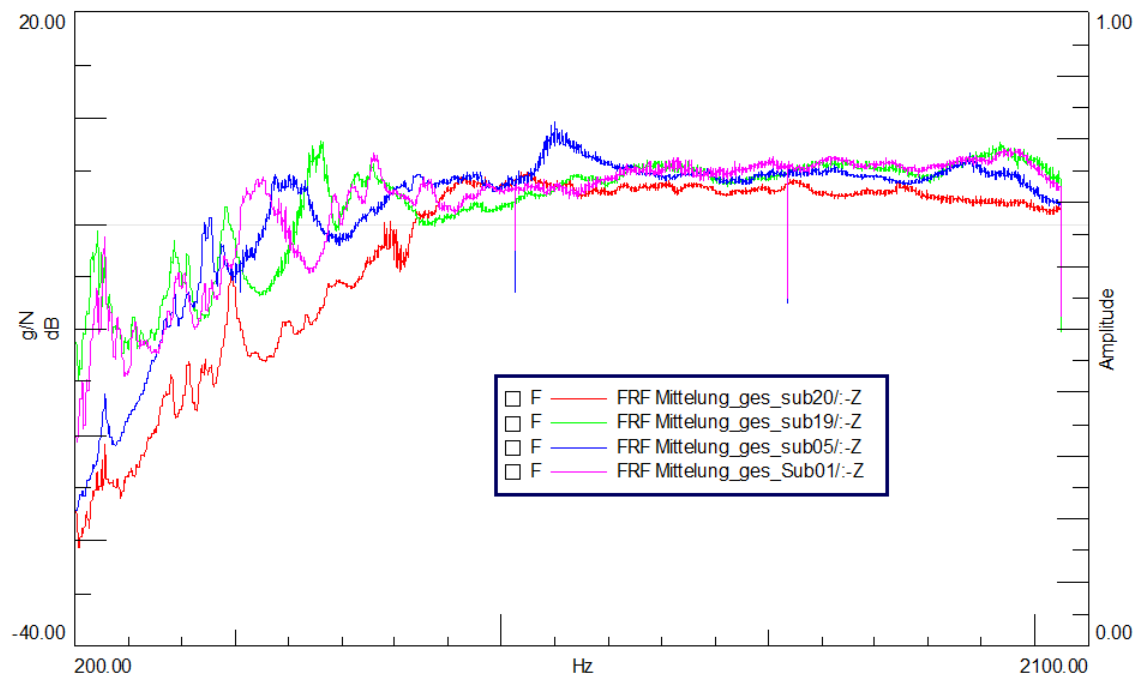
### Anhang 1 Kohärenzbetrachtung, obere Grenzen



Anhang 2 Antwortfunktionen der 4 Subsysteme in X



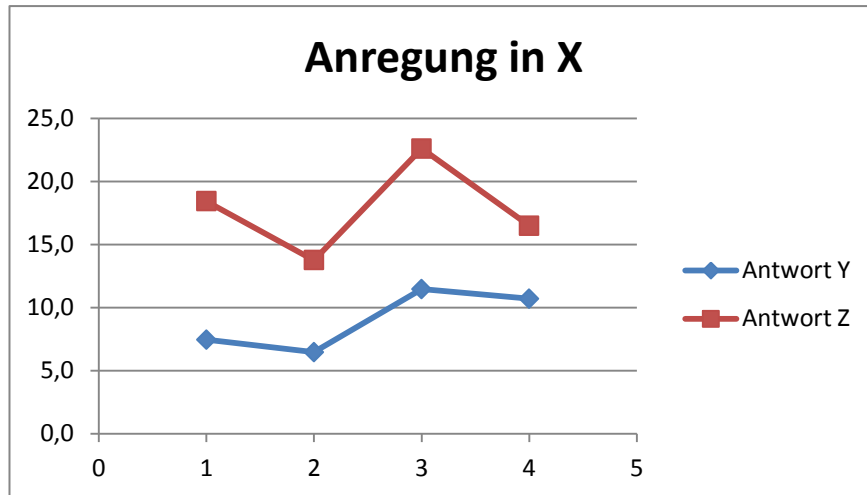
Anhang 3 Antwortfunktionen der 4 Subsysteme in Y



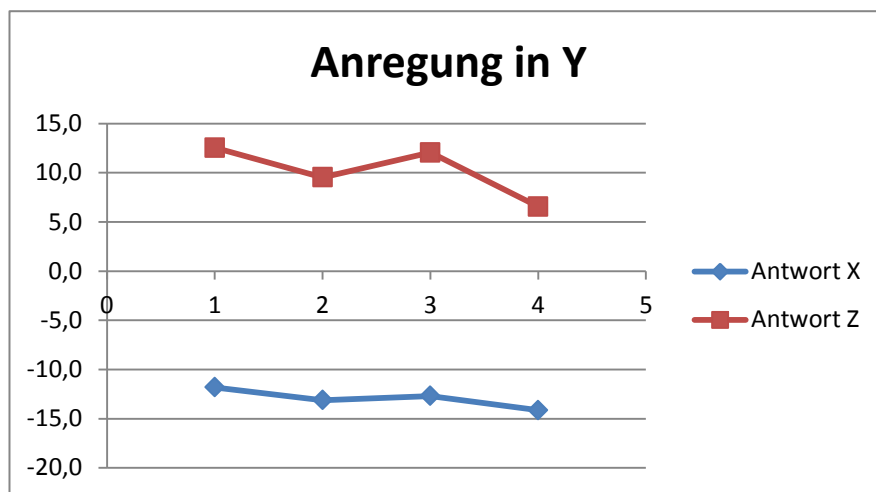
Anhang 4 Antwortfunktionen der 4 Subsysteme in Z

Sub_01	Anregung_X			Anregung_Y			Anregung_Z		
	Messort	Antwort Y	Antwort Z	Messort	Antwort X	Antwort Z	Messort	Antwort X	Antwort Y
	Punkt 1	5,4	16,4	Punkt 1	-8	10,5	Punkt 1	-21,4	-12,4
	Punkt 2	10,6	21	Punkt 2	-11,6	12,1	Punkt 2	-23,8	-14,3
	Punkt 3	-9	12,9	Punkt 3	7,2	15,1	Punkt 3	-18,8	-15,5
	Punkt 4	16,9	28	Punkt 4	-16,6	14,5	Punkt 4	-27	-12,3
	Punkt 5	11,6	27	Punkt 5	-11,3	15,6	Punkt 5	-26,8	-16,1
	Punkt 6	11	15	Punkt 6	-17	11,1	Punkt 6	-28,2	-13,3
	Punkt 7	17,3	21,7	Punkt 7	-19,7	10,7	Punkt 7	-24,8	-9,1
	Punkt 8	-7,5	11,9	Punkt 8	-8,3	13,4	Punkt 8	-19,2	-14
	Punkt 9	10,8	11,9	Punkt 9	-21	9,8	Punkt 9	-22	-9,8
	Ø	7,5	18,4	Ø	-11,8	12,5	Ø	-23,6	-13,0
Sub_05	Anregung_X			Anregung_Y			Anregung_Z		
	Messort	Antwort Y	Antwort Z	Messort	Antwort X	Antwort Z	Messort	Antwort X	Antwort Y
	Punkt 1	-4,5	12,3	Punkt 1	-16,1	7,3	Punkt 1	-17,6	-10
	Punkt 2	8,9	18,2	Punkt 2	-12,6	10	Punkt 2	-18,4	-17,3
	Punkt 3	-5,1	12,8	Punkt 3	-16,6	9,2	Punkt 3	-16,7	-16,5
	Punkt 4	11,1	15,5	Punkt 4	-12,8	12,6	Punkt 4	-21,5	-12,4
	Punkt 5	7,6	11,8	Punkt 5	-8,7	10,1	Punkt 5	-16	-11,3
	Punkt 6	12,3	12	Punkt 6	-8,5	7	Punkt 6	-12	-6,9
	Punkt 7	7,4	18	Punkt 7	-18,6	13,4	Punkt 7	-24,1	-12,4
	Punkt 8	9,1	10,3	Punkt 8	-12,7	9,7	Punkt 8	-19	-13,2
	Punkt 9	11,3	12,9	Punkt 9	-11,4	6,4	Punkt 9	-23,1	-4,2
	Ø	6,5	13,8	Ø	-13,1	9,5	Ø	-18,7	-11,6
Sub_19	Anregung_X			Anregung_Y			Anregung_Z		
	Messort	Antwort Y	Antwort Z	Messort	Antwort X	Antwort Z	Messort	Antwort X	Antwort Y
	Punkt 4	13,3	26,5	Punkt 4	-13,6	12,5	Punkt 1	-24,7	-14,4
	Punkt 5	8,9	27,4	Punkt 5	-6,3	14,5	Punkt 2	-27,1	-21,7
	Punkt 6	8,8	12,6	Punkt 6	-11,1	3,4	Punkt 3	-16,5	-5,8
	Punkt 7	16,9	26,9	Punkt 7	-10,5	12,1	Punkt 4	-24,4	-13
	Punkt 8	10,7	23,6	Punkt 8	-14	22,8	Punkt 5	-24,3	-23,3
	Punkt 9	21,1	20,4	Punkt 9	-24,1	10,4	Punkt 6	-21	-6,9
	Punkt 10	-9,3	20,4	Punkt 10	-7,7	13,7	Punkt 7	-21,3	-15,8
	Punkt 11	12,2	25,1	Punkt 11	-13,7	10,5	Punkt 8	-27	-13,6
	Punkt 12	20,5	20,5	Punkt 12	-13,3	8,6	Punkt 9	-20,7	-8
	Ø	11,5	22,6	Ø	-12,7	12,1	Ø	-23,0	-13,6
Sub_20	Anregung_X			Anregung_Y			Anregung_Z		
	Messort	Antwort Y	Antwort Z	Messort	Antwort X	Antwort Z	Messort	Antwort X	Antwort Y
	Punkt 1	6,1	12,9	Punkt 1	-9	9,4	Punkt 1	-20,5	-14
	Punkt 2	13	18,3	Punkt 2	-18,9	7	Punkt 2	-23,4	-11
	Punkt 3	10,7	13,5	Punkt 3	-10	-8	Punkt 3	-20,6	-10,7
	Punkt 4	10,9	24,2	Punkt 4	-17,6	10,1	Punkt 4	-18,3	-11,5
	Punkt 5	17,8	18	Punkt 5	-11,1	7,2	Punkt 5	-19,6	-13,7
	Punkt 6	-2,6	13,1	Punkt 6	-12,2	10	Punkt 6	-18	-15,2
	Punkt 7	18,2	21,8	Punkt 7	-28,4	7	Punkt 7	-23,1	-6,8
	Punkt 8	11,6	14,6	Punkt 8	-5,9	9,3	Punkt 8	-15,2	-10,1
	Punkt 9	10,6	12	Punkt 9	-14,2	6,9	Punkt 9	-18,5	-10
	Ø	10,7	16,5	Ø	-14,1	6,5	Ø	-19,7	-11,4

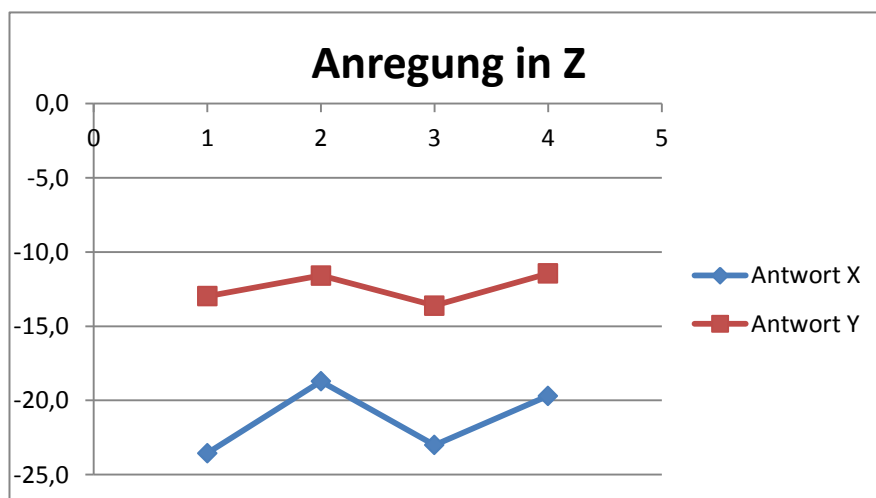
Anhang 5 Gegenüberstellung der Anregerichtung zur den weiteren gemessenen Richtungen



Anhang 6 Gegenüberstellung mit Anregung in X



Anhang 7 Gegenüberstellung mit Anregung in Y



Anhang 8 Gegenüberstellung mit Anregung in Z

Subsystem_01_X	Abweichung_max in dB	Subsystem_01_Y	Abweichung_max in dB	Subsystem_01_Z	Abweichung_max in dB
9 MP	0	9 MP	0	9 MP	0
8 MP	0,5	8 MP	1,3	8 MP	0,4
7 MP	3,6	7 MP	2,5	7 MP	0,4
6 MP	2,8	6 MP	3,7	6 MP	1,7
5 MP	2,4	5 MP	3,7	5 MP	2,2
4 MP	2	4 MP	1,8	4 MP	1,7
3 MP	1,9	3 MP	2,9	3 MP	5,3
Ø	2,2	Ø	2,7	Ø	2,0
	2,3		2,8		1,2
Subsystem_05_X	Abweichung_max in dB	Subsystem_05_Y	Abweichung_max in dB	Subsystem_05_Z	Abweichung_max in dB
9 MP	0	9 MP	0	9 MP	0
8 MP	0,5	8 MP	0,4	8 MP	0,7
7 MP	1,8	7 MP	0,8	7 MP	0,4
6 MP	7,5	6 MP	2,3	6 MP	1
5 MP	2,3	5 MP	1,4	5 MP	7,2
4 MP	6,9	4 MP	4,2	4 MP	3,1
3 MP	10,6	3 MP	4,1	3 MP	7,2
Ø	4,9	Ø	2,2	Ø	3,3
	3,0		1,2		2,3
Subsystem_19_X	Abweichung_max in dB	Subsystem_19_Y	Abweichung_max in dB	Subsystem_19_Z	Abweichung_max in dB
9 MP	0	9 MP	0	9 MP	0
8 MP	0,5	8 MP	3,9	8 MP	0,6
7 MP	1,9	7 MP	3,8	7 MP	1,2
6 MP	4	6 MP	1,6	6 MP	6,5
5 MP	6,4	5 MP	3,6	5 MP	5,5
4 MP	3	4 MP	5,1	4 MP	6
3 MP	6,1	3 MP	5,9	3 MP	5,3
Ø	3,7	Ø	4,0	Ø	4,2
	3,2		3,2		3,5
Subsystem_20_X	Abweichung_max in dB	Subsystem_20_Y	Abweichung_max in dB	Subsystem_20_Z	Abweichung_max in dB
9 MP	0	9 MP	0	9 MP	0
8 MP	0,5	8 MP	0,9	8 MP	2,1
7 MP	1	7 MP	0,9	7 MP	0,6
6 MP	3,8	6 MP	1,4	6 MP	1,4
5 MP	2,4	5 MP	1,7	5 MP	0,7
4 MP	12,2	4 MP	5,9	4 MP	1,7
3 MP	4,3	3 MP	5,3	3 MP	3,9
Ø	4,0	Ø	2,7	Ø	1,7
	1,9		1,2		1,2
Ø X gesamt	3,7	Ø Y gesamt	2,9	Ø Z gesamt	2,8
	2,6		2,1		2,0

Anhang 9 Mittelung und Gegenüberstellung der maximalen Abstände der Antwortfunktionen über 3 – 8 Messpunkte

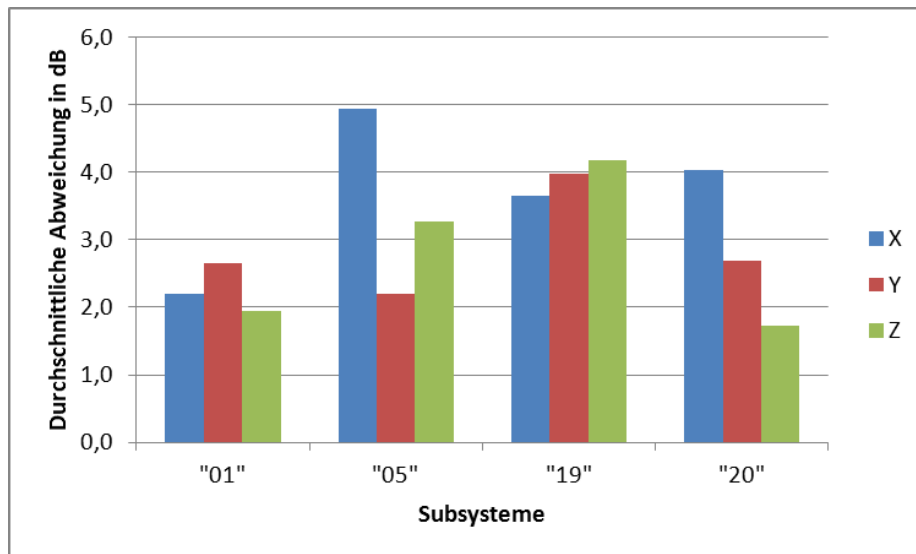


Subsystem_01_X	Abweichung	Mittelwerte	Subsystem_01_Y	Abweichung	Mittelwerte	Subsystem_01_Z	Abweichung	Mittelwerte	Ø X - Z
9 MP	0		9 MP	0		9 MP	0		
5 MP	2,1		5 MP	1,4		5 MP	1,4		
5 MP	1,5	1,8	5 MP	1,6	1,5	5 MP	0,9	1,2	1,5
4 MP	2		4 MP	7,3		4 MP	4,3		
4 MP	4,7	3,4	4 MP	2,8	5,1	4 MP	2,5	3,4	3,9
3 MP	3,7		3 MP	3,2		3 MP	3,2		
3 MP	3,1	3,4	3 MP	6,4	4,8	3 MP	2	2,6	3,6
Ø	2,9		Ø	3,8		Ø	2,4		
Subsystem_05_X	Abweichung	Mittelwerte	Subsystem_05_Y	Abweichung	Mittelwerte	Subsystem_05_Z	Abweichung	Mittelwerte	Ø X - Z
9 MP	0		9 MP	0		9 MP	0		
5 MP	2,2		5 MP	1,7		5 MP	1,2		
5 MP	6,6	4,4	5 MP	3,1	2,4	5 MP	1,4	1,3	2,7
4 MP	8,6		4 MP	3,1		4 MP	2,2		
4 MP	3,1	5,9	4 MP	1,3	2,2	4 MP	2,4	2,3	3,5
3 MP	4,1		3 MP	3		3 MP	1,5		
3 MP	4,1	4,1	3 MP	3	3,0	3 MP	3,6	2,6	3,2
Ø	4,8		Ø	2,5		Ø	2,1		
Subsystem_19_X	Abweichung	Mittelwerte	Subsystem_19_Y	Abweichung	Mittelwerte	Subsystem_19_Z	Abweichung	Mittelwerte	Ø X - Z
9 MP	0		9 MP	0		9 MP	0		
5 MP	2,4		5 MP	4,4		5 MP	2		
5 MP	3,4	2,9	5 MP	1,8	3,1	5 MP	2	2,0	2,7
4 MP	3		4 MP	3,4		4 MP	4,7		
4 MP	5,4	4,2	4 MP	4,7	4,1	4 MP	5,9	5,3	4,5
3 MP	4,2		3 MP	3,3		3 MP	4,9		
3 MP	4,6	4,4	3 MP	3,5	3,4	3 MP	4,9	4,9	4,2
Ø	3,8		Ø	3,5		Ø	4,1		
Subsystem_20_X	Abweichung	Mittelwerte	Subsystem_20_Y	Abweichung	Mittelwerte	Subsystem_20_Z	Abweichung	Mittelwerte	Ø X - Z
9 MP	0		9 MP	0		9 MP	0		
5 MP	2,7		5 MP	1		5 MP	0,8		
5 MP	1,7	2,2	5 MP	1,6	1,3	5 MP	1,1	1,0	1,5
4 MP	3,4		4 MP	2,3		4 MP	2,4		
4 MP	2,5	3,0	4 MP	3,5	2,9	4 MP	1,2	1,8	2,6
3 MP	4,5		3 MP	2,3		3 MP	2,4		
3 MP	6,6	5,6	3 MP	3,5	2,9	3 MP	1,1	1,8	3,4
Ø	3,6		Ø	2,4		Ø	1,5		

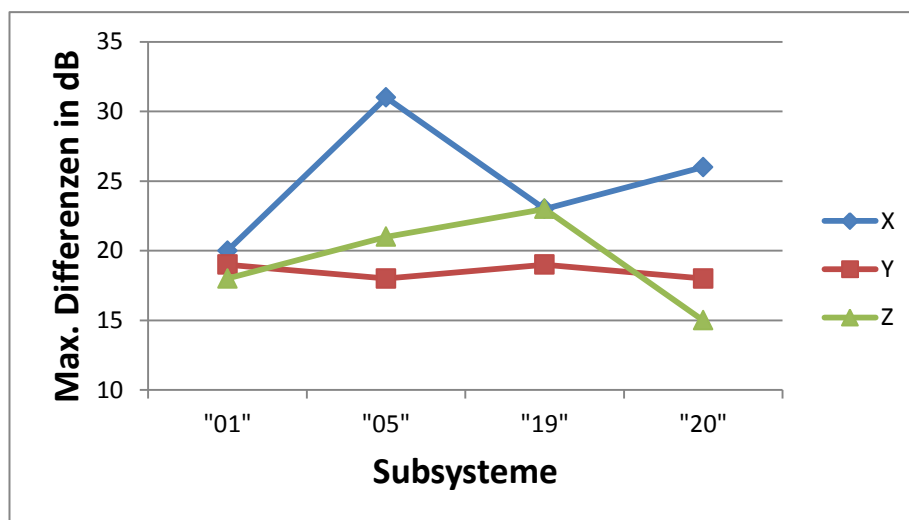
#### Anhang 10 zufällige Messpunktauswahlen - gemittelt

Subsystem_05_X	Abweichung	Mittelwerte	Subsystem_05_Y	Abweichung	Mittelwerte	Subsystem_05_Z	Abweichung	Mittelwerte	Ø X - Z	Ø X-Z;Sub01-
9 MP	0		9 MP	0		9 MP	0			
5 MP	1,5		5 MP	4,3		5 MP	1,8			
5 MP	1,9	1,7	5 MP	1,6	3,0	5 MP	1,8	1,8	2,2	1,9
4 MP	1,5		4 MP	4,6		4 MP	2,1			
4 MP	1,7	1,6	4 MP	2,1	3,4	4 MP	2,1	2,1	2,4	3,3
3 MP	2,8		3 MP	4,9		3 MP	3,8			
3 MP	2,3	2,6	3 MP	3,1	4,0	3 MP	7,1	5,5	4,0	3,8
Ø	2,0		Ø	3,4		Ø	3,1			

#### Anhang 11 zufällige Messpunktauswahlen - gemittelt, MP 6 wegen starker Abweichungen ausgegrenzt und Mittelung gesamt



Anhang 12 Durchschnittliche Abweichungen der FRF über 3 - 9 MP



Anhang 13 maximale Abweichungen der Antwortfunktionen

Sub_01 MP	x		y		z	
	min	max	min	max	min	max
1	330	2000	80	1350	40	1630
2	320	1940	280	2000	120	1900
3	300	1850	170	1350	100	2000
4	250	1600	20	1850	50	1950
5	kein	kein	170	1200	130	750
∅	300	1848	144	1550	88	1646

Anhang 14 untere und obere Grenzen Subsystem 1

Sub_05 MP	x		y		z	
	min	max	min	max	min	max
1	170	1450	150	1900	80	1600
2	270	1200	160	1460	50	1000
3	440	1930	100	1900	160	1900
4	170	1230	100	1900	150	1550
5	130	1400	200	1430	100	1560
∅	236	1442	142	1718	108	1522

Anhang 15 untere und obere Grenzen Subsystem 5

Messort		Terzen										
Anregung in	Sub_01_X	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	energ. Mittel
Antwort in dB	Sub_01_X	-25,7	-18,7	-18,1	-10,8	-1,3	-5,8	-2,5	3,1	8,4	10,9	13,0
Antwort in dB	Sub_05_X	-44,2	-32,5	-33,8	-21,2	-10,4	-17,8	-9,6	-5,1	-2	1,9	
Differenz		18,5	13,8	15,7	10,4	9,1	12	7,1	8,2	10,4	9	
Anregung in	Sub_01_Y	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	energ. Mittel
Antwort in dB	Sub_01_Y	-25,9	-15,7	-16,1	-9,9	-1,6	-3	2,9	5,5	11,3	10,9	10,5
Antwort in dB	Sub_05_Y	-40,4	-28,5	-29,9	-16,1	-8,9	-10	-5,2	0,1	2,8	1,4	
Differenz		14,5	12,8	13,8	6,2	7,3	7	8,1	5,4	8,5	9,5	
Anregung in	Sub_01_Z	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	energ. Mittel
Antwort in dB	Sub_01_Z	-13	-3,3	-6,8	-2,4	4,8	4,1	8,6	7,9	9,3	8,8	10,2
Antwort in dB	Sub_05_Z	-26,3	-15,6	-20,3	-10,7	-4,6	-0,9	0,7	0,4	1,1	-0,1	
Differenz		13,3	12,3	13,5	8,3	9,4	5	7,9	7,5	8,2	8,9	
Anregung in	Sub_05_X	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	energ. Mittel
Antwort in dB	Sub_05_X	-29,6	-26,5	-22,8	-18	-13,5	-8,1	1,4	6,2	11,5	13	11,5
Antwort in dB	Sub_01_X	-45	-32,5	-37,3	-28,4	-20,3	-20,8	-11,9	-2,6	2,4	7,1	
Differenz		15,4	6	14,5	10,4	6,8	12,7	13,3	8,8	9,1	5,9	
Anregung in	Sub_05_Y	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	energ. Mittel
Antwort in dB	Sub_05_Y	-25	-22	-17,5	-9,8	-7,7	-3,1	2,6	2	4	12,2	7,2
Antwort in dB	Sub_01_Y	-32,8	-22,1	-22,9	-12	-6,9	-11,6	-8,7	-7	-0,5	3	
Differenz		7,8	0,1	5,4	2,2	-0,8	8,5	11,3	9	4,5	9,2	
Anregung in	Sub_05_Z	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	energ. Mittel
Antwort in dB	Sub_05_Z	-24,4	-16,5	-14,3	-5,9	-2,3	3,1	7,6	8,6	8,3	8,1	7,4
Antwort in dB	Sub_01_Z	-28,1	-18,7	-20,8	-9,9	-2,2	-6,9	-4	-0,8	1,7	1,2	
Differenz		3,7	2,2	6,5	4	-0,1	10	11,6	9,4	6,6	6,9	

Anhang 16 Differenzen der Subsysteme zueinander

400Hz	1	2	3	4	5	6
1	2,99E-06	3,08E-06	8,90E-09	3,05E-08	2,05E-08	1,54E-07
2	8,11E-08	2,29E-06	5,01E-09	1,28E-08	3,37E-09	1,74E-08
3	1,67E-08	4,19E-08	1,38E-05	4,88E-09	5,49E-09	9,33E-08
4	3,59E-07	1,33E-06	3,88E-08	-9,08E-07	6,56E-08	2,52E-07
5	3,24E-08	3,79E-07	1,64E-08	5,71E-09	1,97E-05	6,64E-08
6	9,68E-09	1,24E-07	3,13E-08	1,97E-09	7,06E-09	7,44E-05

Anhang 17 Verlustfaktoren 400Hz Terz

500Hz	1	2	3	4	5	6
1	1,30E-07	2,62E-06	-2,95E-09	1,08E-06	-7,72E-09	-5,27E-08
2	7,91E-08	1,40E-06	4,74E-09	6,77E-08	1,61E-09	3,08E-08
3	7,91E-09	5,59E-08	1,96E-06	-3,92E-09	3,73E-10	1,06E-08
4	1,13E-06	-2,12E-07	7,12E-09	1,76E-06	1,82E-08	3,55E-08
5	8,83E-08	-4,28E-09	7,43E-09	-1,10E-08	2,85E-06	6,00E-09
6	4,95E-09	1,79E-08	5,95E-09	-1,06E-09	8,69E-10	1,52E-05

Anhang 18 Verlustfaktoren 400Hz Terz

630Hz	1	2	3	4	5	6
1	1,38E-06	1,52E-07	1,08E-09	6,68E-08	-2,70E-09	4,98E-10
2	1,86E-09	7,06E-08	8,71E-10	5,44E-11	1,59E-09	1,57E-10
3	1,20E-09	1,92E-09	6,69E-07	5,83E-10	9,71E-10	2,26E-09
4	5,73E-08	5,37E-09	8,64E-10	6,23E-08	7,85E-10	4,68E-11
5	3,00E-09	3,39E-08	5,47E-08	4,76E-10	2,67E-07	2,58E-11
6	8,51E-10	8,12E-10	1,16E-08	-1,47E-11	7,71E-11	2,14E-06

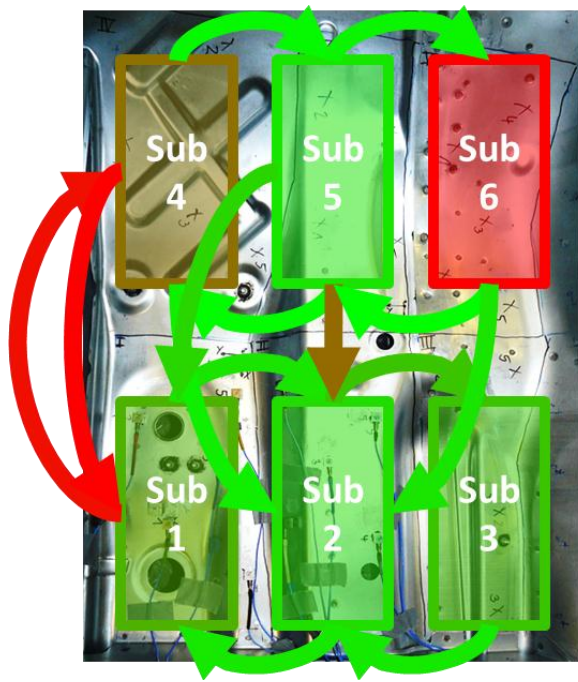
Anhang 19 Verlustfaktoren 400Hz Terz

800Hz	1	2	3	4	5	6
1	4,35E-08	1,18E-10	4,81E-11	3,63E-09	6,62E-13	3,08E-12
2	6,90E-11	5,60E-09	3,80E-11	7,15E-11	3,25E-12	3,43E-12
3	6,00E-11	7,87E-10	1,25E-07	2,04E-11	-1,84E-14	2,50E-10
4	1,14E-08	6,95E-09	3,59E-10	1,91E-07	2,00E-11	6,96E-11
5	3,30E-11	1,52E-09	1,87E-11	1,86E-11	1,79E-09	2,92E-11
6	5,74E-11	7,58E-10	3,05E-09	3,11E-11	1,93E-12	3,42E-07

Anhang 20 Verlustfaktoren 400Hz Terz

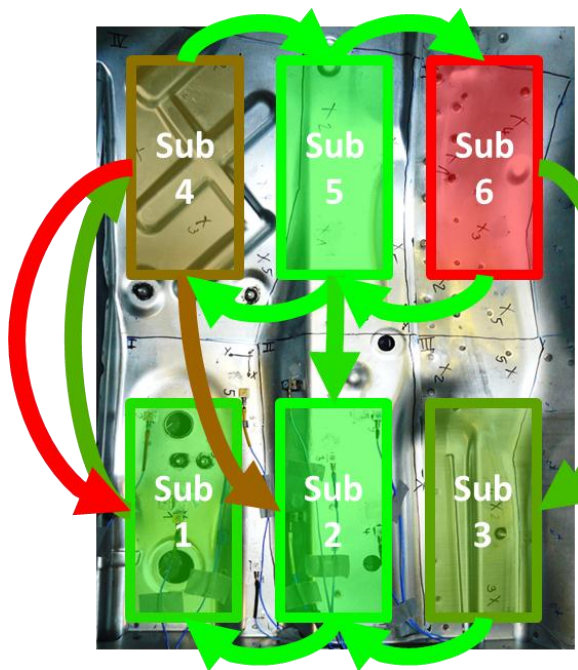
315Hz	1	2	400Hz	1	2
1	7,66E-05	8,63E-07	1	1,04E-05	7,97E-08
2	3,67E-06	2,02E-04	2	5,66E-06	-1,96E-06
500Hz	1	2	630Hz	1	2
1	5,12E-06	1,44E-06	1	4,86E-07	1,13E-08
2	4,05E-06	4,47E-06	2	8,58E-08	3,38E-07
800Hz	1	2	1000Hz	1	2
1	3,75E-08	6,75E-11	1	1,27E-08	1,32E-10
2	7,88E-09	1,10E-08	2	8,57E-10	1,32E-08

Anhang 21 Verlustfaktoren zusammengefasste Subsysteme (1:2:3 ; 4:5:6)



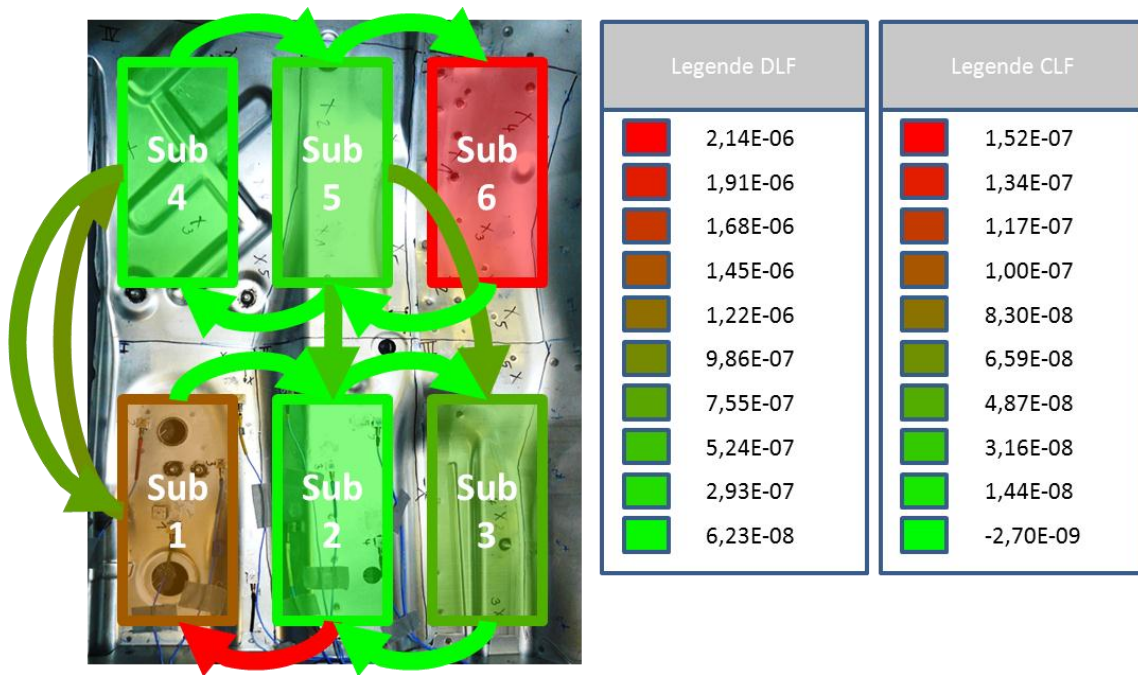
Legende DLF		Legende CLF	
	2,23E-08		3,53E-10
	2,00E-08		3,13E-10
	1,78E-08		2,74E-10
	1,56E-08		2,35E-10
	1,33E-08		1,96E-10
	1,11E-08		1,57E-10
	8,88E-09		1,18E-10
	6,65E-09		7,84E-11
	4,42E-09		3,93E-11
	2,19E-09		1,22E-13

Anhang 22 Grafik 6 Subsysteme 1000Hz Terz

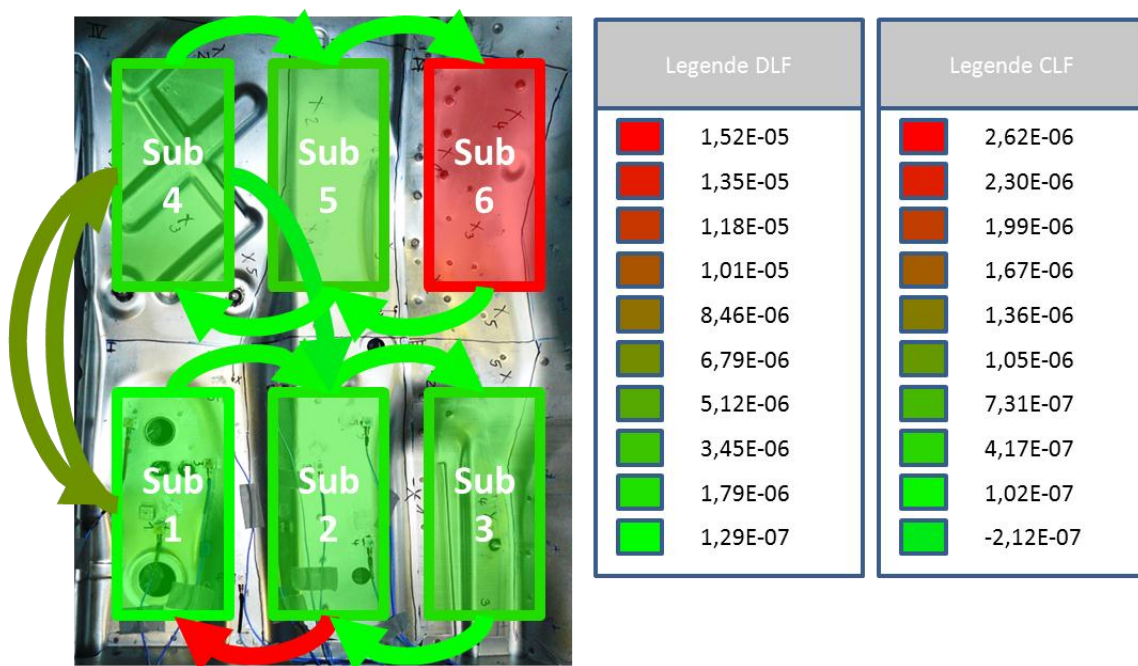


Legende DLF		Legende CLF	
	3,42E-07		1,14E-08
	3,04E-07		1,01E-08
	2,67E-07		8,86E-09
	2,29E-07		7,59E-09
	1,91E-07		6,33E-09
	1,53E-07		5,06E-09
	1,15E-07		3,80E-09
	7,74E-08		2,53E-09
	3,96E-08		1,27E-09
	1,79E-09		-1,84E-14

Anhang 23 Grafik 6 Subsysteme 800Hz Terz

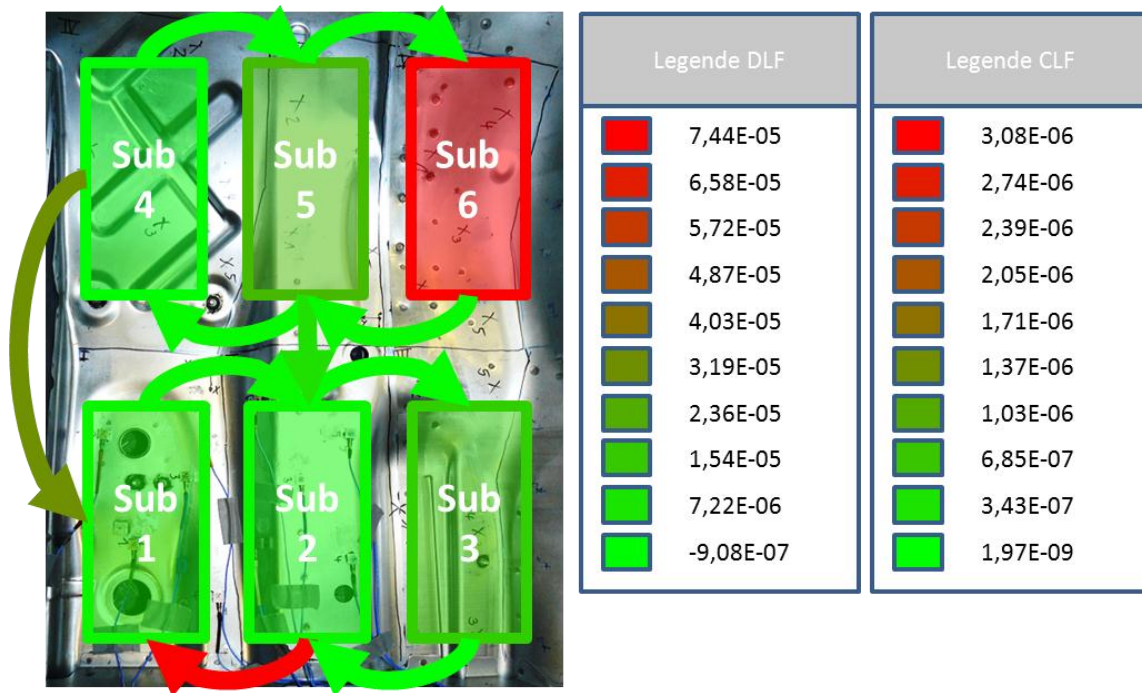


Anhang 24 Grafik 6 Subsysteme 630Hz Terz



Anhang 25 Grafik 6 Subsysteme 500Hz Terz





Anhang 26 Grafik 6 Subsysteme 400Hz Terz



## Quellenverzeichnis

- [1] Körperschall - Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen / Michael Möser ; Wolfgang Kropp. - 3., aktualisierte Auflage. - Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [2] DE LANGHE, Koenraad; High Frequency Vibrations: contributions to experimental and computational SEA parameter identification techniques – Februar 1996, Leuven, Katholische Universität Leuven, Dissertation, 1996
- [3] Handbuch Fahrzeugakustik - Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch / Peter Zeller. - Wiesbaden : Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2009
- [4] Physik für Ingenieure / Paul Dobrinski ; Gunter Krakau ; Anselm Vogel. - 12., aktualisierte Auflage. - Wiesbaden : Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2010
- [5] Messtechnik der Akustik / Michael Möser. - Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [6] Acoustics for Engineers - Troy Lectures / Blauert, Jens ; Xiang, Ning. - Second Edition. - Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [7] Technische Akustik / Michael Möser. - 8., aktualisierte Aufl.. - Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [8] Prof. Dr. Ing. Jörn Hübelt, Unterlagen zur Vorlesung Maschinenakustik, HTW Mittweida, 2009/10
- [9] [www.Wikipedia.de](http://www.Wikipedia.de), August 2010
- [10] Dr. Joe Venor, Advanced SEA Training Course, ESI Group, 2008
- [11] Prof. Dr.-Ing. habil. W. Hufenbach, Dr.-Ing. O. Täger, Dipl.-Ing. M. Dannemann, Entwicklung von Verfahren zur Bedämpfung von steifen Stahl/Alukarosseriestrukturen im Hinblick auf Schwingungsreduktion und Leichtbau, TU Dresden, 2006
- [12] Christian Landsberg, Henning Niehaus, Hammermessung mit PAK, FH Köln, 2002

- [13] PDF – Standards Universal File Format
- [14] [http://www.humantec-gmbh.com/schallschutz\\_koerperschalldaempfung.html](http://www.humantec-gmbh.com/schallschutz_koerperschalldaempfung.html), September 2010

## **Eigenständigkeitserklärung**

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Ingolstadt, 30. September 2010

Thomas Adam